



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO
CONVENCIONAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO**

Lucas Ruppenthal

Lajeado, dezembro de 2018.

Lucas Ruppenthal

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO
CONVENCIONAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO**

Monografia de Conclusão de Curso - Etapa II,
do curso de Engenharia Civil, da
Universidade do Vale do Taquari -
UNIVATES, como exigência para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo.

Lajeado, dezembro de 2018.

Lucas Ruppenthal

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO
CONVENCIONAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO**

A Banca examinadora abaixo aprova o Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Prof. Me. Rafael Mascolo (Orientador)
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Marcelo Freitas Ferreira
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado, dezembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela saúde e força para superar as dificuldades, sempre iluminando meu caminho; também, a todos que, de uma forma ou outra, colaboraram e participaram da realização desta pesquisa, em especial:

A minha mãe Viviane, aos meus Avós Elaine e Elemar, a minha tia Jaqueline, ao meu irmão Bernardo, e à família, que me alegram e me incentivam sempre, me norteando ao longo da vida;

A minha namorada, Alice, por todo apoio e paciência, especialmente durante os momentos mais importantes;

Ao meu orientador, Professor Me. Rafael Mascolo por toda atenção disponibilizada, apoio e ensinamentos que tornaram possível a realização deste trabalho;

A todos os professores do curso de Engenharia Civil, que foram muito importantes para minha graduação;

Aos amigos e colegas, pela ajuda e incentivo constante. Também devo agradecimento a todos que contribuíram com a execução dos ensaios realizados: aos laboratoristas Vianeí, Guilherme, Laura e Marcelo, do LATEC.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

(Henry Ford)

RESUMO

Atualmente a sustentabilidade tem sido um dos principais desafios para indústria da construção civil, pois visa reduzir os impactos ambientais e o alto consumo dos recursos naturais. Com isso, a construção civil tem buscado e elaborado projetos com o intuito de melhorar a sustentabilidade, avaliando a reutilização de resíduos em materiais de construção. Neste contexto, pesquisou-se uma alternativa para o reaproveitamento do resíduo vítreo, proveniente do processo de moagem de garrafas do tipo *long neck* e do pó de vidro, oriundo do processo de jateamento com microesferas de vidro. Este estudo teve como objetivo verificar a viabilidade da adição deste resíduo vítreo como substituto parcial do cimento *Portland* na produção do concreto convencional. As proporções de substituições foram corrigidas em massa, estabelecidas em percentuais de 10%, 20% e 30% para todos os ensaios. Para o concreto no estado fresco, foi realizado ensaio de consistência através do método troco de cone (*slump*), onde todos os traços realizados ficaram entre 100mm e 160mm estabelecidos em norma; no estado endurecido, os concretos foram submetidos à ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral aos 3, 7, 28 e 63 dias. O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado com idade única de 28 dias, bem como módulo de elasticidade aos 63 dias. Os resultados permitiram avaliar alterações nas propriedades do concreto equiparando com um traço referência. O traço que melhor se equiparou com o traço referência em todos os ensaios, bem como atingiu os 30MPa de resistência à compressão, foi o traço com teor de 10% de substituição do cimento pelo resíduo de vidro. No ensaio de absorção por capilaridade, tal traço teve melhor desempenho, sendo o concreto com menor teor de permeabilidade. Portanto, nesta pesquisa, acredita-se que substituir parcialmente o cimento por resíduo de vidro em um teor de até 10% seja viável, visto que tal percentual em grande escala pode gerar considerável redução de impactos ambientais na extração da matéria prima e na produção do cimento, bem como dar um destino para tais resíduos de vidro.

Palavras-chave: Resíduo Vítreo, Reciclagem do Vidro, Concreto com Resíduos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio de Abatimento Tronco de Cone	35
Figura 2 – Ensaio de Resistência à Tração Direta	39
Figura 3 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	40
Figura 4 – Ensaio de Resistência à Tração por Flexão	40
Figura 5 – Fluxograma do Programa Experimental	43
Figura 6 – Procedimentos antes da Moagem do Vidro	48
Figura 7 – Resíduo de Vidro após o Peneiramento	48
Figura 8 – Corpos de Provas	52
Figura 9 – Ensaio Abatimento Tronco de Cone	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resíduo de Vidro e sua Possível Utilização na Construção Civil	13
Quadro 2 – Destinação dos Resíduos Sólidos	18
Quadro 3 – Classificação dos Resíduos Sólidos	19
Quadro 4 – Estudos da Aplicação do Resíduo de Vidro	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do Vidro e do Cimento CP V ARI	21
Tabela 2 – Limite Granulométrico do Agregado Miúdo	30
Tabela 3 – Limite Granulométrico do Agregado Graúdo	31
Tabela 4 – Granulometria da Areia	45
Tabela 5 – Granulometria da Brita	46
Tabela 6 – Traços do Método IPT/EPUSP	49
Tabela 7 – Requisitos Mínimos de Resistência	51
Tabela 8 – Traço Referência	51
Tabela 9 – Traços com Resíduo de Vidro	52
Tabela 10 – Limites de Abatimento Tronco de Cone	53
Tabela 11 – Atividade Pozolânica	59
Tabela 12 – Resultados do Abatimento Tronco de Cone	60
Tabela 13 – Resultados da Resistência à Compressão Axial	61
Tabela 14 – Resultados de Resistência à Tração Compressão Diametral	63
Tabela 15 – Resultados de Absorção de Água por Capilaridade	65
Tabela 16 – Resultados do Módulo de Elasticidade	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de Abrams	32
Gráfico 2 – Relação Porosidade e Resistência	32
Gráfico 3 – Influência do Agregado na Resistência do Concreto	33
Gráfico 4 – Curva de Gauss	38
Gráfico 5 – Curva Granulométrica da Areia	45
Gráfico 6 – Curva Granulométrica da Brita	47
Gráfico 7 – Gráfico de Dosagem IPT/EPUSP	50
Gráfico 8 – Gráfico da Resistência à Compressão Axial	62
Gráfico 9 – Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral	64
Gráfico 10 – Absorção de Água do Traço Referência	65
Gráfico 11 – Absorção de Água do Traço com 10% de Resíduo	66
Gráfico 12 – Absorção de Água do Traço com 20% de Resíduo	66
Gráfico 13 – Absorção de Água do Traço com 30% de Resíduo	67
Gráfico 14 – Médias de Absorção de Água dos Diferentes Traços	67
Gráfico 15 – Gráfico do Módulo de Elasticidade	69

LISTA DE ABREVIATÖES E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

RV – Resíduo de Vidro

MPa – Mega Pascal

REF – Traço Referência

RV 10 – Traço com 10% de Resíduo de Vidro

RV 20 – Traço com 20% de Resíduo de Vidro

RV 30 – Traço com 30% de Resíduo de Vidro

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

AMBEV – Companhia de Bebidas das Américas

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

UNIVATES – Universidade do Vale do Taquari

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivo Geral.....	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 Delimitação da pesquisa.....	18
1.5 Estrutura da pesquisa.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 Resíduos Sólidos	20
2.2 Destinação dos Resíduos Sólidos	21
2.3 Classificação dos Resíduos	22
2.4 Vidro	23
2.5 Processo Produtivo	24
2.6 Reciclagem	25
2.7 Construção Civil e Meio Ambiente.....	27
2.8 Uso de Resíduo Como Agregado.....	28
2.9 Estudos da Aplicação do Resíduo Vítreo em Concretos	28
2.10 Concreto de Cimento <i>Portland</i>.....	30
2.10.1 Cimento <i>Portland</i>.....	31
2.10.2 Agregados.....	32
2.10.2.1 Agregado Miúdo	32
2.10.2.2 Agregado Graúdo	33

2.10.3 Água	34
2.10.4 Relação Água/Cimento	36
2.11 Propriedades do Concreto Fresco	37
2.12 Propriedades do Concreto Endurecido	38
2.12.1 Massa Específica	38
2.12.2 Resistência Mecânica	39
2.12.2.1 Resistência à Compressão	40
2.12.2.2 Resistência à Tração	42
2.13 Permeabilidade do Concreto	43
2.14 Módulo de Elasticidade	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Cimento	47
3.2 Agregado Miúdo	47
3.3 Agregado Graúdo	49
3.4 Resíduo de Vidro	50
3.5 Dosagem dos Concretos	52
3.6 Ensaio do Concreto no Estado Fresco	56
3.7 Ensaio do Concreto no Estado Endurecido	57
3.7.1 Resistência à Compressão Axial	58
3.7.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral	58
3.7.3 Módulo de Elasticidade	58
3.7.4 Absorção por Capilaridade	59
4 RESULTADOS	60
4.1 Caracterização do Resíduo de Vidro	60
4.1.1 Caracterização Física do Resíduo de Vidro	61
4.1.2 Índice de Atividade Pozolânica	61
4.2 Ensaio Realizado em Concreto Fresco	62
4.2.1 Ensaio de Abatimento Tronco de Cone	62
4.3 Ensaio Realizado em Concreto Endurecido	63
4.3.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial	64

4.3.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	65
4.3.3 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	67
4.3.4 Ensaio de Módulo de Elasticidade.....	71
 5 CONCLUSÕES	 73
 REFERÊNCIAS.....	 76

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é conhecida como uma das principais atividades para o desenvolvimento econômico e social, mas por outro lado, a atividade comporta-se como grande geradora de impactos ambientais, quer seja pelo consumo de recursos naturais, ou pela vasta geração de resíduos. Além de consumir recursos naturais, o setor da construção civil também tem a capacidade de absorver os resíduos gerados por ela ou por outras atividades econômicas, podendo incorporar os mesmos aos materiais de construção, entre eles o concreto (PINTO, 2005).

Segundo Neto (2005), o principal responsável pelo elevado índice de geração de resíduos na construção civil é o desperdício de materiais de construção. Com propósito de reduzir esse problema, o autor propõe a implantação de políticas públicas que visam o controle destes materiais, desde a coleta até a disposição final dos resíduos. Ângulo, Zordan e John (2011) afirmam que o tipo de resíduo, a tecnologia a ser empregada na reciclagem e a finalidade do material reciclado, podem tornar este processo mais impactante do que o próprio resíduo era antes de ser reciclado.

O processo de incorporar resíduos em concretos está sendo cada vez mais estudado e analisado por pesquisadores espalhados pelo mundo, inicialmente pela necessidade de alternativas da destinação dos resíduos, uma vez que as leis ambientais estão ficando mais severas, e, também pela capacidade do concreto de absorver esses resíduos sem causar danos ao meio ambiente, sendo possível ainda haver melhoras em algumas propriedades da mistura (ROSÁRIO; TORRESCASANA, 2011).

O resíduo a ser analisado neste trabalho é o resíduo de vidro comum em forma de pó, advindo do processo de moagem de garrafas do tipo *long neck* ou do processo de jateamento com microesferas de vidro. O reaproveitamento dos resíduos de vidro com propriedades pozolânicas no composto cimentício, visa diminuir danos ambientais, reduzindo assim a extração de matéria-prima para a fabricação do cimento Portland e o encaminhamento dos resíduos para um destino adequado.

Conforme Gobbi, Mattana e Medeiros (2011), além das vantagens ambientais e econômicas, estes resíduos aplicados podem possibilitar melhorias em algumas propriedades do composto cimentício, pois os mesmos estão relacionados com a fabricação de concretos de alta resistência e alto desempenho, devido ao efeito químico da formação de silicato de cálcio hidratado, este responsável pela resistência mecânica do concreto. Dizem ainda, que a aplicação destes resíduos no composto cimentício permite um preenchimento nos vazios devido ao tamanho reduzido de suas partículas, diminuindo assim a permeabilidade e, conseqüentemente, crescendo a durabilidade do material.

Analisando a importância do assunto, decidiu-se aprofundar os estudos referentes a aplicação dos resíduos de vidros, diante da necessidade de encontrar aplicações para os mesmos, de forma a evitar sua destinação em aterros sanitários.

1.1 Justificativa

Cada vez mais aumenta a busca por racionalização dos recursos naturais de forma a preservar o meio ambiente, poupando os recursos e reduzindo custos. Segundo John e Agopyan (2000), a reciclagem é uma atividade que vem desde muito antigamente fomentada por razões econômicas, e utilizar os resíduos como material de construção é uma das condições primordiais para se atingir o desenvolvimento sustentável.

A sustentabilidade tornou-se um dos assuntos mais discutidos dentro da sociedade atual (CHEN et al., 2013). Essas discussões se resultam das rápidas transformações na natureza causadas pelas ações do homem, que aceleram o

consumo dos recursos naturais não renováveis. O setor da construção civil contribui significativamente na aceleração das transformações da natureza, sendo que seu papel principal é a transformação do ambiente natural em um ambiente que possibilite um melhor desenvolvimento econômico (JOHN; AGOPYAN, 2000).

Para que os resíduos possam ser utilizados na construção civil, os novos materiais fabricados com a adição dos mesmos devem atender às exigências físicas, mecânicas e de durabilidade especificadas em normas, devendo esses apresentarem resultados similares ou superiores aos já existentes (BARBOZA et al., 2008; LIMA; ROSSIGNOLO, 2010). Essas condições estabelecidas para o material são necessárias, uma vez que o setor da construção civil necessita oferecer materiais de boa qualidade e com vida útil prolongada.

Segundo a resolução nº307 do CONAMA (BRASIL, 2002), o vidro é considerado pertencente a Classe B (reciclável). Desta maneira, o mesmo deverá ser reutilizado, reciclado ou encaminhado para uma área de armazenamento temporário, de modo a permitir sua utilização ou reciclagem futura. O resíduo vítreo é foco de estudos com o objetivo de adicioná-lo na composição de novos materiais da construção civil, a fim de favorecer o meio ambiente proporcionando um material tão duradouro e com a qualidade equivalente. No Quadro 1 são apresentadas diversas utilidades para os resíduos de vidro na construção civil.

Quadro 1 – Resíduo de vidro e sua possível utilização na construção civil

RESÍDUO	UTILIZAÇÃO
VIDRO	Pozolanas
	Sistemas de Drenagem
	Agregados
	Fibra de Vidro
	Bases e sub-bases de Rodovias e Ferrovias

Fonte: Calmon (2007).

Contudo, as garrafas de cerveja do tipo *long neck*, podem causar problemas significativos ao meio ambiente, pois após o consumo da bebida, estas garrafas são simplesmente descartadas, sendo tratadas como um lixo comum, o que impacta em um grande volume nos aterros.

Um processo que é muito utilizado em empresas é o jateamento utilizando granalha de vidro. Uma característica importante desse processo é que, além da ação de limpeza, é possível obter um acabamento superficial acetinado de grande beleza e uniformidade. Com a forma esférica dos grãos utilizados no jateamento, associada a dureza e a densidade do vidro, é possível remover contaminações (sujeiras e ferrugens) de superfícies, sem interferir na resistência das peças tratadas.

Com a eficácia desse processo, é possível assegurar, independentemente do metal a ser jateado, que não há remoção de material significativamente mensurável. Apesar desses benefícios que o jateamento com microesfera de vidro proporciona, o mesmo gera um considerável volume de pó de vidro.

As duas formas de vidro serão abordadas no presente trabalho visando a substituição por cimento. Visto que a indústria cimenteira é uma das principais emissoras de gases poluentes para a atmosfera, mais especificamente CO₂ (dióxido de carbono), devido à calcinação das matérias-primas durante sua produção. Segundo Ali, Saidur e Hossain (2011), uma das alternativas para reduzir a emissão de CO₂ seria a utilização de adições no cimento, de forma a diminuir o uso de clínquer na fabricação do cimento Portland.

Com base nas premissas citadas anteriormente, o estudo pretende verificar a efetividade do concreto produzido com resíduo de vidro em forma de pó, como substituto parcial do cimento em diferentes percentuais de substituição, de modo a diminuir o custo de produção, dar um destino mais nobre à sucata de vidro e reduzir impactos ambientais na extração de recursos naturais, bem como a emissão de CO₂. Portanto, pode-se dizer que ao reduzir algum composto do material cimentício pelo resíduo sem que haja avarias em suas propriedades físicas e mecânicas, haverá uma maior conservação dos recursos naturais.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar o potencial do resíduo de vidro proveniente da moagem de garrafas do tipo *long neck* juntamente com pó de vidro derivado do processo de jateamento utilizando microesferas de vidro como substituto parcial do cimento.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Avaliar a consistência do concreto no estado fresco;
- Analisar a resistência mecânica dos concretos submetidos à compressão;
- Analisar a resistência mecânica dos concretos submetidos à tração;
- Avaliar o comportamento do concreto quanto ao módulo de elasticidade;
- Avaliar a absorção de água do concreto por capilaridade.

1.4 Delimitação da pesquisa

A pesquisa é limitada à comparação entre as propriedades físicas e mecânicas de um concreto convencional com as propriedades de um concreto com incorporação de resíduo de vidro finamente moído, em substituição parcial do cimento *Portland* em diferentes porcentagens.

Não será feita quantificação financeira do consumo reduzido do cimento, ou custos de materiais e processo de moagem do vidro.

1.5 Estrutura da pesquisa

O capítulo 1 traz uma introdução do tema a ser desenvolvido na pesquisa e a sua importância, bem como os objetivos geral e específicos e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é desenvolvida a referência bibliográfica, na qual é abordado assuntos referentes ao resíduo de vidro comum, assim como a caracterização de seus componentes. É apresentado também os materiais que compõem a mistura do concreto, assim como as propriedades mecânicas deste.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e os métodos utilizados no decorrer da pesquisa, estando estes em conformidade com suas respectivas normas técnicas. São definidos a dosagem e os percentuais de substituição do resíduo vítreo pelo cimento, bem como os ensaios realizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e as análises de cada traço realizado para cada ensaio ao qual foram submetidos, comentando sobre as exigências e cumprimentos das normativas.

No capítulo 5 é apresentado a conclusão da pesquisa, bem como é proposto outras ideias para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Inicialmente é apresentado um embasamento teórico do assunto para um melhor entendimento da pesquisa, apresentando alguns conceitos relativos ao vidro comum utilizado na fabricação das garrafas do tipo *long neck* e do pó de vidro oriundo do processo de jateamento, bem como o processo de geração do resíduo do vidro e o problema desse resíduo na natureza.

2.1 Resíduos Sólidos

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define resíduo sólido como:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível [...] (BRASIL, 2010, p.3).

Segundo Valério, Silva e Cohen (2008), os termos lixo e resíduos são frequentemente utilizados para denominar os materiais produzidos e descartados em uma sociedade. Assim, pode-se dizer que os resíduos sólidos englobam todos materiais com certo grau de rigidez que possuem formas aleatórias próprias; mas, no entanto, necessitam análises para sua classificação.

A vida útil de um material é limitada, sendo assim, não há material que não se torne um resíduo. Assim, a reutilização desses resíduos na construção civil na forma de novos materiais para construção é uma alternativa para um avanço no desenvolvimento sustentável (JOHN, 2000).

2.2 Destinação dos Resíduos Sólidos

No Brasil, uma das primeiras iniciativas com o objetivo de orientar o destino correto dos resíduos sólidos da construção civil e incentivar a reciclagem destes resíduos é a resolução nº307 da CONAMA. Essa resolução surgiu da necessidade de reduzir os impactos ambientais causados por tais resíduos (BRASIL, 2002).

É importante saber sobre a composição qualitativa e quantitativa do resíduo, uma vez que isso serve como base para que seja definido serviços de coleta, transporte, tratamentos e disposição final a ser dado para o resíduo, de forma a reduzir impactos ambientais que os mesmos possam vir a provocar. Quanto melhor for o conhecimento das características dos resíduos produzidos, melhores serão as soluções de gestão e tratamento (VALÉRIO; SILVA; COHEN, 2008).

Segundo França e Ruaro (2009), os resíduos sólidos no Brasil, podem ser destinados em lixões e aterros. É apresentado o Quadro 2 com descrições detalhadas de cada método de destinação.

Quadro 2 – Destinação dos Resíduos Sólidos

Destinação dos resíduos sólidos	Descrição
Lixões	Trata-se do método mais utilizado, onde não existe separação dos resíduos sólidos, o acondicionamento é precário, tendo em vista que é despejado a céu aberto, contaminando o ambiente, e normalmente conta com a presença de pessoas e animais no local.
Aterro controlado	É a área na qual é implementada pelo menos uma medida mínima de controle ambiental, como o isolamento, acesso restrito, cobertura dos resíduos com terra, controle de entrada de resíduos, dentre outras.
Aterro sanitário	É a disposição controlada de resíduos sólidos no solo e sua posterior cobertura diária. Uma vez depositados, os resíduos sólidos se degradam naturalmente por via biológica até a mineração da matéria biodegradável, em condição fundamentalmente anaeróbia.

Fonte: França e Ruaro (2009).

2.3 Classificação dos Resíduos

De acordo com a PNRS, os resíduos são classificados quanto a origem e a periculosidade, diante dos riscos potenciais de contaminação ao meio ambiente. Com relação à origem dos resíduos industriais, podem ser denominados como “aqueles obtidos através de processos produtivos e instalações industriais” (BRASIL, 2010).

A classificação dos resíduos sólidos, regida pela NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004), ocorre de acordo com a sua periculosidade, sendo ela dividida em resíduos perigosos e não perigosos, este por sua vez se subdivide em outros dois grupos, classificados como inertes e não inertes como apresenta o Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 – Classificação dos Resíduos Sólidos

Quanto à Periculosidade	Descrição
Resíduos Perigosos	São aqueles que em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, toxidade, teratogenicidade, reatividade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental.
Resíduos não Perigosos	Se caracterizado como resíduo não perigoso, em razão de sua natureza, composição ou volume, este pode ser equiparado aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal, se subdividindo em Inertes e Não Inertes .
	NÃO INERTES - Lixo comum, gerado em qualquer unidade industrial. Podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
	INERTES - O resíduo não deve constar nos anexos da NBR 10004, não pode estar contaminado com nenhuma substância citada nos anexos C, D ou E da Norma e deve ser testado seguindo os métodos analíticos indicados. Como exemplo de alguns materiais, pode-se citar: rochas, tijolos, vidros e alguns plásticos e borrachas.

Fonte: Adaptado da NBR 10004 (2004).

2.4 Vidro

O vidro é uma substância inorgânica, sem estrutura atômica definida e fisicamente homogênea, podendo ser encontrado no resfriamento de uma massa em fusão ou no aquecimento de óxidos ou derivados em temperaturas que podem variar entre 1500°C e 1600°C. Com essa elevada temperatura o vidro se torna fluído, podendo ser moldado em diferentes formatos, e após essa etapa são resfriados em condições controladas (ABIVIDRO, 2014).

Após o vidro passar pelo processo de arrefecimento controlado, o mesmo se transforma em um material rígido, homogêneo, inerte, amorfo e isotrópico, no qual uma de suas principais qualidades é ser moldável à elevadas temperaturas, sem que ocorra qualquer tipo de degradação no material. Além disso, o vidro pode ter características como a transparência e a dureza, estas que o distingue de outros materiais por ter tais características sem ser um material poroso e nem absorvente, possuindo um índice de dilatação e condutividade térmica baixo, sendo um ótimo isolador (ORTIZ, 1996).

O principal constituinte do vidro é a sílica ou óxido de silício – SiO_2 . O vidro em sua estrutura atômica ainda não definida, segundo Fragata et al. (2007), é constituído essencialmente por sílica e por uma menor porcentagem de óxido de sódio (Na_2O) e de óxido de cálcio (CaO). No intuito de utilizar o resíduo de vidro como substituto parcial do cimento na produção do concreto, foi elaborado uma tabela que apresenta de forma simplificada os principais elementos da composição química do cimento CP V ARI e do vidro comum, a fim de compará-las.

Na Tabela 1 a seguir, é possível observar que os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e CaO são os principais elementos em ambas as composições, e que, se somados os percentuais da composição do resíduo de vidro comum que se assemelham com os óxidos da composição do cimento CP V ARI, pode-se observar que os mesmos ultrapassam 70% do total.

Tabela 1 – Composição Química do Vidro e do Cimento CP V - ARI

Composição	Teor (%)	
	Vidro	Cimento
SiO ₂	72,40	21,49
Al ₂ O ₃	0,70	5,81
Fe ₂ O ₃	0,11	3,73
CaO	8,60	61,34
MgO	4,00	—
Na ₂ O	13,60	—
K ₂ O	0,30	1,80
TiO ₂	0,02	0,33

Fonte: Adaptado de Luz e Ribeiro (2006); Moura, Leite e Bastos (2012).

2.5 Processo Produtivo

No processo de fabricação do vidro, ainda que o teor de sílica usada seja em maior quantidade, é a barrilha que possui o maior custo nesse processo, isto porque não é uma matéria encontrada no Brasil. Ela também é utilizada para reduzir a temperatura de fusão, que deve ser mantida constante, uma vez que o forno foi ativado. Outro componente que eleva significativamente o custo da produção é o gás natural, utilizado como combustível para os fornos (MONTANO; BASTOS, 2013).

As fases de fabricação e pós fabricação dos elementos vítreos exigem um controle adequado da temperatura, o que favorece a utilização do gás natural, sendo aplicado em fornos de fusão, de têmpera, queima e linha de choque térmico (MARQUES, 2012).

Segundo Montano e Bastos (2013), após o término do processo de fabricação do vidro, o mesmo pode ser comercializado diretamente com o consumidor final, sendo para grandes empresas, distribuidores, lojas ou até mesmo para o público em geral, para aqueles que demonstrarem interesse. Além de ser utilizado em sua forma tradicional de produção, o vidro pode ter suas propriedades específicas alteradas, apenas passando por um processo de tratamento.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade da Ambev (2016), para a fabricação de garrafas do tipo *long neck*, é utilizado aproximadamente 65% de material vítreo reciclado, o que reduz consideravelmente o consumo de matéria prima natural. Os materiais para reciclagem chegam de adegas, bares, supermercados e parceiros das cooperativas de reciclagem, que recebem pelo material entregue. As garrafas utilizadas no processo de reciclagem são garrafas de vidro retornáveis de 600 ml e de 1000 ml.

Ainda sobre Ambev (2016), após o recebimento do material vítreo, os mesmos passam por uma etapa de limpeza e posteriormente são colocados em forno de fusão, no qual a matéria sólida é transformada em líquida onde é colocada em moldes. A partir desse processo o vidro já inicia a fase de resfriamento natural, tendendo ao endurecimento; porém, ainda maleável, ele é cortado e recebe o sopro final, este que dá a forma da garrafa. As garrafas que não forem aprovadas retornam para o processo inicial.

2.6 Reciclagem

No setor da construção civil, o processo de reciclagem pode gerar inúmeros benefícios, bem como a redução do consumo de recursos naturais não renováveis e da energia consumida no processo de extração dos insumos. Além disso, a área de aterro necessária para depósito pode também ser reduzida, uma vez que o volume de resíduos se minimiza (PINTO, 1999).

Segundo a PNRS, a reciclagem é um processo de transfiguração dos resíduos que envolve alterar suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, visando a transformação em novos produtos (BRASIL, 2010). É de suma importância a reciclagem dos resíduos sólidos a fim de preservação, conservação e diminuição do consumo dos recursos naturais não renováveis, atendendo as necessidades da sociedade sem comprometer a sobrevivência de futuras gerações (LUCAS; BENATTI, 2008).

Contudo, a reciclagem no Brasil é precária no quesito de coleta e disposição final dos resíduos. Apesar dessa precariedade no sistema de reciclagem, a necessidade de algumas famílias aumentarem suas rendas, associadas à questão ambiental e viabilidade econômica favorecem a atividade (SANTOS et al., 2004).

As indústrias fabricantes do vidro sempre tiveram destaque na reciclagem de seus produtos, e nos últimos anos, grandes investimentos foram feitos para estimular o retorno das embalagens de vidro descartável como matéria prima para fabricação de novos produtos. A reciclagem permite reduzir o consumo de matérias primas naturais, como areia, calcário, barrilha entre outros, e consequentemente reduzir também os impactos ambientais. (ABIVIDRO, 2014).

Segundo Godinho, Holanda e Silva (2005), produtos de vidro são totalmente reaproveitáveis, seja por métodos de reutilização, como o reenvasamento de garrafas, ou pela reciclagem, na produção de novos produtos. Conforme a Abividro (2014), a reutilização dos elementos vítreos consome quantidades menores de energia, emitindo um volume reduzido de CO₂, contribuindo na preservação do meio ambiente.

Um forte mercado para o resíduo de vidro são as vidraçarias, que podem comprar o produto de sucateiros já na forma de cacos, podendo reduzir os custos de coleta urbana. Apesar do vidro ser totalmente reaproveitável, sua reciclagem possui diversos fatores limitantes, que prejudicam esse processo, bem como as impurezas, custos de transporte para recolhimento e aditivos de coloração, utilizados para garrafas coloridas (SILVA et al., 2011).

O pó do vidro derivado do processo de moagem ou quebra de peças de vidro, assim como o pó gerado no processo de jateamento com microesferas de vidro, nas indústrias beneficiadoras de vidro, podem ser considerados uma impureza no processo de separação e reciclagem, pois apesar de ser um material inerte, se lavado aos rios, pode aumentar o pH e a turbidez da água (LUZ; RIBEIRO, 2008).

Segundo Ambev (2016), por utilizar elevado percentual de resíduo reciclado na fabricação das garrafas *long neck*, as mesmas têm sua composição química modificada. Tal modificação deu-se para baratear o custo de fabricação e tornar as

garrafas competitivas no mercado; no entanto, o resultado compromete a resistência da embalagem e não permite o seu retorno para um segundo envase.

2.7 Construção Civil e Meio Ambiente

Os impactos causados pelos resíduos ao meio ambiente são decorrentes da deposição de forma incorreta, sendo eles depositados pelas ruas e/ou em cursos d'água. Essa prática inadequada pode provocar assoreamentos, alagamentos e até mesmo proliferação de agentes causadores de doenças. Em conjunto ainda, tem-se a poluição visual e a poluição do meio ambiente (MUCELIN; BELLINI, 2008).

O setor da construção civil é um dos principais consumidores dos recursos naturais, além de ser gerador de um grande volume de resíduos. Analisando o fator ambiental, esse setor se torna ainda mais preocupante. As práticas utilizadas nesse setor com ideias sustentáveis, possuem o mesmo objetivo, que é o uso racional dos recursos naturais, em especial, o reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados (GARÉ, 2008).

Os resíduos gerados pela construção civil durante os processos de construção e demolição, geralmente são considerados sem utilidade, causadores de diversos problemas ambientais quando não dispostos em local adequado. Como alternativa para reciclagem desses resíduos, o autor cita que os mesmos podem ser utilizados em obras de pavimentação, na confecção de concreto, argamassas entre outros (OLIVEIRA, 2007).

Para um destino adequado dos resíduos sólidos e a necessidade de preservação do meio ambiente, visando a sustentabilidade, é necessário desenvolver materiais alternativos. Segundo Alcântara (2009), os profissionais da construção civil são responsáveis por adequar os princípios da construção sustentável ao cotidiano.

2.8 Uso de Resíduo Como Agregado

Os resíduos adicionados aos concretos têm o intuito de melhorar as características mecânicas dos mesmos, ou de simplesmente diminuir o volume desses resíduos nos aterros. Alguns países já utilizam essa técnica de reaproveitamento dos resíduos sólidos. Na Austrália, por exemplo, é adicionado ao concreto vidro moído proveniente do lixo como agregado fino. No Brasil, essa técnica é pouquíssima utilizada, uma vez que o aterro é uma opção barata e a matéria prima para produção do cimento é abundante (LOPEZ; AZEVEDO; NETO, 2005).

Utilizando resíduos como agregado, estes deixam de ter um papel apenas econômico na composição do concreto, pois podem influenciar não só na trabalhabilidade como também em suas propriedades físicas e mecânicas. Por isso, características importantes devem ser analisadas antes da utilização dos resíduos como agregado, a granulometria, a absorção de água, a resistência à tração e compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias nocivas presentes nos materiais (METHA e MONTEIRO, 1994).

Observa-se um avanço nas pesquisas para utilizar resíduos para produção de novos materiais, o que seria considerado uma situação ideal. Todavia, utilizar resíduos na produção do concreto pode se tornar uma prática não muito viável economicamente, visto que as técnicas de separação e preparação desse resíduo para utilização na construção civil possuem custos elevados (LAURITZEN, 1998).

2.9 Estudos da Aplicação do Resíduo Vítreo em Concretos

A aplicação de resíduos de vidro como materiais de construção, aplicados em matrizes cimentícias vem sendo foco de muitos estudos. Estas pesquisas apontam o potencial de utilização deste resíduo como substituto parcial na forma de agregados, aglomerantes ou pozolanas, em argamassas e concretos. Alguns resultados satisfatórios têm sido encontrados, tanto nas propriedades das matrizes, quanto pelo

fato de consumir quantidade significativa do material que seria descartado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Metha e Monteiro (2008) ainda citam que, por existir uma diversidade de vidros, sua composição tende a ser diferente, por isso, diversos resíduos vítreos vêm sendo estudados, a fim de observar diferentes ações nas propriedades específicas das argamassas e concretos. Entretanto, a quantidade de sílica presente na composição química dos vidros é bastante comum, pois é o principal componente desse material.

Com isso, a fim de compreender melhor as aplicações do resíduo de vidro em concretos e as interferências desse resíduo nas propriedades mecânicas, nesta pesquisa foram analisados demais autores que utilizaram o resíduo de vidro em diversas formas de aplicação; porém, nesse estudo buscou-se priorizar o uso em concreto convencional, substituindo o resíduo de vidro pelo cimento em diferentes percentuais de substituição; estes realizados em massa. No intuito de simplificar a apresentação dos estudos, foi elaborado o Quadro 4 a seguir, onde é apresentado os diferentes autores e suas respectivas pesquisas, bem como as características adotadas por eles.

Quadro 4 – Estudos da Aplicação de Resíduo Vítreo

Autores	Características	Pesquisa
Antônio (2012)	Cimento: CP V ARI RS Teor substituição: 5, 10, 15 e 20% Traço: 1:2,05:2,79 (massa) Relação água/cimento: 0,51	Concretos com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro
Ismail e Al-Hashmi (2009)	Cimento: CP I (ASTM C150) Teor substituição: 10%, 15% e 20% Traço: 1:1,88:2,68 (volume) Relação água/cimento: 0,53	Concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Lam, Poon e Cham (2007)	Cimento: CP (BS 12) Teor substituição: 50% Traço: 1:1:3 (massa) Relação água/cimento: 0,47	Concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro e adições minerais
Nassar e Soroushian (2012)	Cimento: CP I (ASTM C150) Teor substituição: 20% Traço: 1:1,39:2,03 (volume) Relação água/cimento: 0,38 e 0,50	Concretos com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro

Fonte: Adaptado pelo Autor (2018).

As pesquisas analisadas avaliaram a utilização do resíduo vítreo como substituto parcial do material cimentício ou do agregado miúdo. De acordo com Nassar e Soroushian (2012), a dimensão das partículas de vidro deve ser controlada, pois podem influenciar nas propriedades da matriz cimentícia, devido uma reação álcali-sílica (RAS), causando fissurações na matriz e comprometendo o desempenho mecânico e durabilidade da mesma.

Autores como Lam, Poon e Cham (2007) e Ismail e Al-Hashmi (2009), observaram em matrizes cimentícias, com incorporação de resíduo de vidro com dimensões inferiores a 100 μ m que as expansões pela reação álcali-sílica foram controladas. Entretanto, Antônio (2012) afirma que a expansão ocasionada pela RAS é controlada apenas quando o resíduo vítreo é utilizado em granulometrias extremamente finas, ou seja, em dimensões inferiores à 75 μ m.

Segundo Metha e Monteiro (2008), o resíduo de vidro dentro dessa faixa granulométrica, se torna um inibidor da reação álcali-sílica, pois a grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição, quando dividida em minúsculas frações, passa a apresentar alta atividade pozolânica, ou seja, o resíduo em contato com umidade, passa a reagir quimicamente com hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentícias. Essa reação pozolânica é bastante eficiente para preenchimento de espaços capilares, melhorando assim, a resistência e impermeabilidade do concreto.

2.10 Concreto de Cimento *Portland*

O concreto é oriundo de reações químicas de liberação de calor, que são ocasionadas pela mistura homogênea de cimento, agregados graúdos e miúdos e água. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o que torna o concreto um material amplamente utilizado nas construções civis são:

- Trabalhabilidade;
- Resistência à água;
- Plasticidade;

- Menor consumo de energia em relação a outros materiais;
- Baixo custo;
- Fácil acesso;
- Resistência térmica;
- Resistência à compressão.

Ainda conforme Metha e Monteiro (2014), as propriedades do concreto podem ser alteradas dependendo do tipo de cimento que é utilizado em sua fabricação, podendo assim influenciar diretamente na qualidade e homogeneidade da pasta.

Faz-se necessário observar a proporção correta dos aglomerantes, consumo de água e utilização de aditivos, levando em consideração também a correta forma de adensamento, manipulação e a cura do concreto, a fim de se obter um concreto com as características desejadas em projeto (AMBROZEWICZ, 2012).

2.10.1 Cimento *Portland*

Segundo a NBR 5733 - Cimento Portland com Alta Resistencia Inicial (ABNT, 1991), o cimento é um material hidráulico composto por clínquer e gesso, advindo da moagem do clínquer formado por silicato de cálcio hidráulico e sulfato de cálcio.

Ambrozewicz (2012) salienta que, para se obter melhores resultados na utilização do cimento, é necessário entender sua composição:

[...] o cimento Portland é um pó fino com propriedades aglutinantes que endurece sob ação da água, sendo sem dúvida um aglomerante hidráulico. É o mais importante dos aglomerantes, sendo de fundamental importância conhecer bem suas propriedades, para poder aproveitá-las da melhor forma possível [...]

A água, assim que adicionada no cimento, já passa a influenciar em suas características. O cimento, por ser um material hidráulico, na presença da água, hidrata os silicatos e aluminatos presentes; e estes por sua vez, tornam o cimento um material sólido e resistente (METHA; MONTEIRO, 2014).

A velocidade de hidratação do cimento está relacionada com o tamanho de suas partículas; portanto, conhecer a granulometria do cimento é de suma importância na hora de sua escolha, visto que uma rápida hidratação no concreto pode impactar no surgimento de microfissuras. O grau de hidratação também tem efeito direto na caracterização do concreto, pois influencia diretamente na porosidade e consequentemente em sua resistência (METHA; MONTEIRO, 2014).

A escolha do cimento a se utilizar deve ser correspondente a sua finalidade, pois cada tipo de cimento *Portland* apresenta vantagens e desvantagens variando conforme sua composição de grãos e adições. Portanto, uma análise do caso deve ser feita antes da escolha do cimento, pois quanto menor for a dimensão dos grãos do cimento, mais reativo ele é, o que pode influenciar na velocidade das reações durante o período de cura (TUTIKIAN, 2004).

2.10.2 Agregados

Segundo Metha e Monteiro (2014), os agregados são diretamente responsáveis pelo comportamento do concreto, pois eles ocupam um volume correspondente a 75% do seu total. Sabendo disso, é necessário conhecer as características dos agregados a ser utilizados, entre elas o seu formato, textura, resistência e absorção de água, pois os mesmos podem impactar na qualidade, durabilidade e resistência do concreto.

2.10.2.1 Agregado Miúdo

Para garantir qualidade e durabilidade do material a ser produzido, deve ser levado em consideração diretrizes provenientes da NBR 7211 – Agregados para Concreto - Especificação (ABNT, 2005), pois nela estão estabelecidos limites máximos e mínimos para substâncias que possam gerar problemas ao concreto.

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005), a partir dos dados apresentados na Tabela 2 a seguir, é possível observar a porcentagem de material passante em cada peneira, sendo capaz de compreender os limites das zonas utilizáveis e ótimas.

Tabela 2 – Limite Granulométrico do Agregado Miúdo

Peneira com abertura de malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS

- 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Segundo Souza (2009), para se obter um concreto de qualidade, o agregado miúdo deve estar isento de matérias orgânicas, pois estas tendem a diminuir a adesão dos agregados ao cimento.

2.10.2.2 Agregado Graúdo

Segundo Souza (2009), os agregados graúdos devem ser obrigatoriamente provenientes de rochas, com exceção dos agregados artificiais. Além disso, devem ser inertes, não podendo alterar suas características quando adicionados ao cimento.

O agregado graúdo, regido pela NBR 7211 (ABNT, 2005), é padronizado dentro de faixas granulométricas estabelecidas e podem ser vistas na Tabela 3 a seguir, a qual apresenta os percentuais de material retido em cada peneira, sendo possível classificar o tipo de agregado a ser utilizado.

Tabela 3 – Limite Granulométrico do Agregado Graúdo

Peneira com abertura de malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ²¹				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0-5
63 mm	-	-	-		5-30
50 mm	-	-	-	0-5	75-100
37,5 mm	-	-	-	5-30	90-100
31,5 mm	-	-	0-5	75-100	95-100
25 mm	-	0-5	5-25 ²¹	87-100	-
19 mm	-	2-15 ²¹	65 ²¹ -95	95-100	-
12,5 mm	0-5	40 ²¹ -65 ²¹	92-100	-	-
9,5 mm	2-15 ²¹	80-100	95-100	-	-
6,3 mm	40-65 ²¹	92-100	-	-	-
4,75 mm	80 ²¹ -100	95-100	-	-	-
2,36 mm	95-100	-	-	-	-

Fonte: NBR 7211 (2009).

A composição dos agregados graúdos e miúdos é o que confere ao concreto uma boa resistência; por isso, quando existe vazios gerados pela má união dos agregados, deve-se utilizar agregados com granulometrias menores para que esses vazios sejam preenchidos. Reduzindo o número de vazios, reduz também a porosidade do concreto, o que diminui a absorção de água (NEVILLE e BROOKS, 2013).

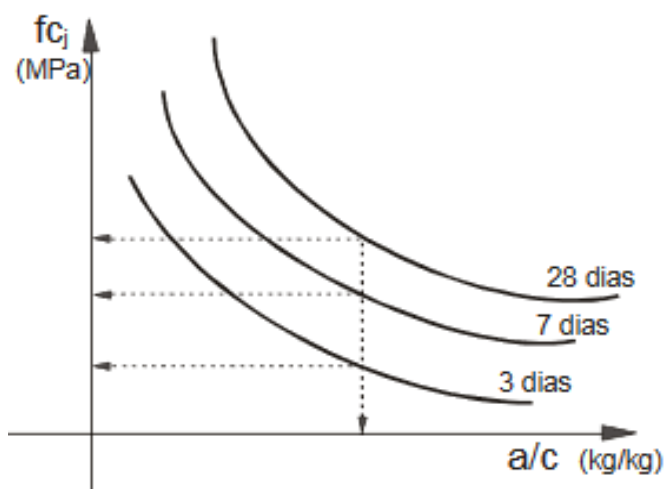
2.10.3 Água

A água tem influência direta no concreto, tanto em seu estado fresco, como em seu estado endurecido. A principal função da água é iniciar as reações de hidratação e proporcionar trabalhabilidade ao concreto. Em 1918, Duff Abrams descobre que existe uma relação entre o fator água/cimento e sua resistência, descoberta que hoje é conhecida como Lei de Abrams (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A partir de estudos, Duff Abrams concluiu que a água influencia em diversas propriedades que impactam na resistência do concreto, bem como a trabalhabilidade, coesão, porosidade e a permeabilidade. A partir disso, ele elaborou o Gráfico 1 a

seguir, para correlacionar o fator água/cimento com a resistência do concreto (HELENE; TERZIAN, 1993).

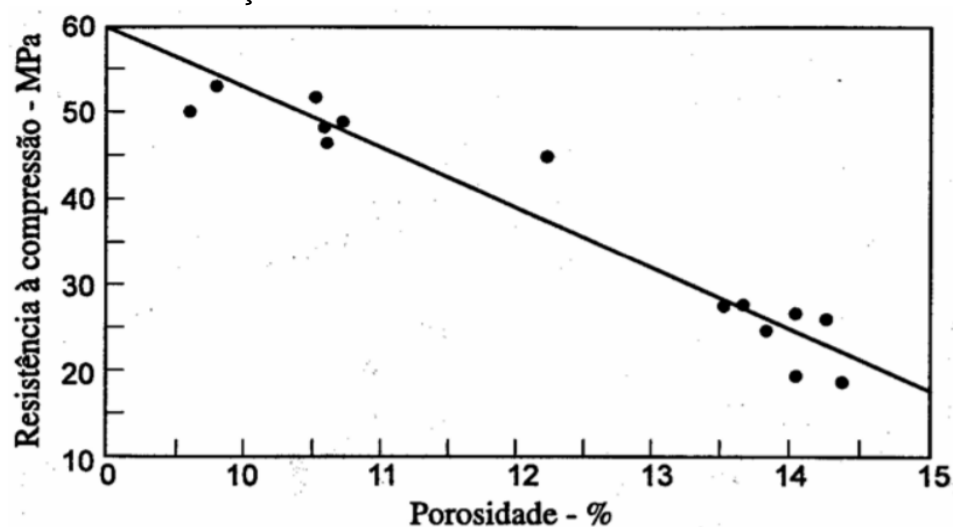
Gráfico 1 – Curva de Abrams



Fonte: Helene e Terzian (1993).

Estudos relacionando a resistência do concreto com as características estudadas por Duff Abrams são realizados por Neville e Brooks (2013), os quais afirmam que a porosidade do concreto aumenta conforme o fator água/cimento aumenta, isso resulta na diminuição da resistência do concreto, podendo ser observado no Gráfico 2, que demonstra a diminuição da resistência conforme o aumento do percentual de porosidade.

Gráfico 2 – Relação Porosidade e Resistência



Fonte: Neville e Brook (2013).

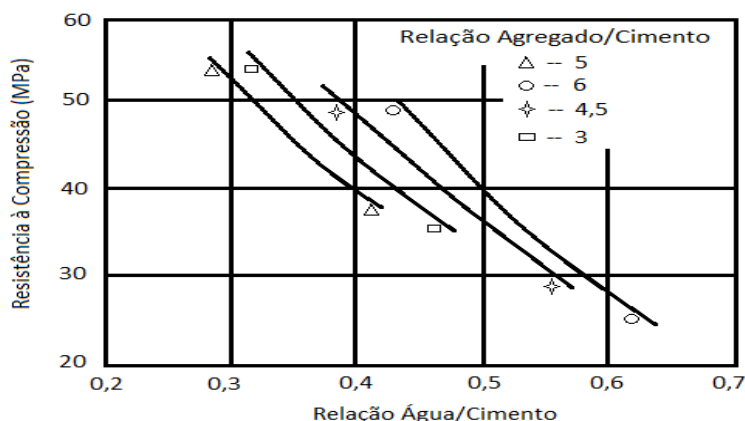
A água é um dos principais fatores que influenciam na qualidade do concreto. Por isso, a água é um elemento que requer atenção, pois a mesma é de extrema importância para o concreto e suas propriedades. A água a ser utilizada na fabricação do concreto deve ser pura, livre de impurezas, o que reduz a chance de ocorrer problemas nas propriedades do concreto (PETRUCCI, 1998).

2.10.4 Relação Água/Cimento

A relação água/cimento e o grau de adensamento são definidos como os principais fatores que determinam a resistência do concreto. Isso porque são eles que influenciam na porosidade do concreto (PETRUCCI, 1998). Segundo Fornasier (1995), o controle da porosidade no concreto e a redução dos poros na pasta de cimento estão relacionados diretamente com a diminuição da relação água/cimento.

A diminuição da relação água cimento faz com que as partículas do cimento se aproximem uma das outras; portanto, no momento de iniciar as reações de hidratação do concreto, a estrutura se fecha mais rapidamente, resultando em um concreto menos poroso. Segundo Neville e Brooks (2013), além da relação água/cimento e do grau de adensamento, deve-se ainda considerar o tipo de agregado presente, pois o mesmo também pode influenciar na resistência do concreto, como pode ser visto no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Influência do Agregado na Resistência do Concreto



Fonte: Neville e Brook (2013).

2.11 Propriedades do Concreto Fresco

Para que se obtenha um concreto de boa qualidade, faz-se necessário planejamento e cuidados com a execução. Um concreto endurecido com boas características se deve à preparação dos materiais ainda em seu estado fresco, devendo-se fazer uma dosagem adequada, bem como mistura, adensamento e cura do concreto, uma vez que falhas nessa etapa resultarão em prejuízos para o concreto endurecido, podendo comprometer sua resistência (MELADO, 2014).

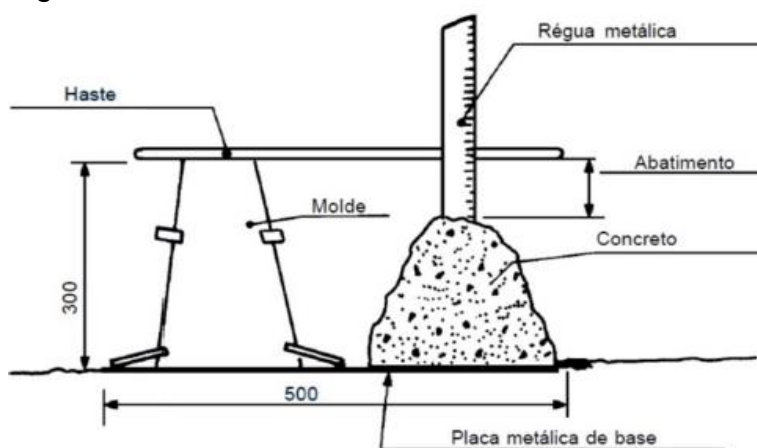
Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2007), o principal objetivo do concreto é obter resistência mecânica, com reduzido volume de vazios; para isso, o concreto ainda fresco, deve ter algumas propriedades principais, entre elas:

- **Trabalhabilidade:** essa é uma característica do concreto fresco que determina a facilidade na qual o concreto pode ser manipulado sem perder sua homogeneidade; dessa forma, o material pode ser misturado sem que haja problemas com segregação e exsudação, que é a separação dos componentes da mistura e a migração da água para superfície do concreto, respectivamente (PETRUCCI, 1998);
- **Homogeneidade:** essa característica consiste na uniformidade dos componentes do concreto, formando uma massa homogênea, sem a formação de bolhas de ar e espaços vazios. Essas características dão-se pelo adensamento, podendo ser utilizado vibradores (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2007).

Após algumas horas do adensamento, o concreto passa a ficar viscoso, dando início ao período de pega, onde a consistência do concreto impossibilita sua trabalhabilidade. A partir dessa etapa, deve-se iniciar os cuidados com a hidratação do concreto; ou seja, a cura do concreto. Alguns procedimentos devem ser realizados para manter a mistura úmida, de modo a evitar a evaporação precoce da água, evitando a retração do material e garantindo assim umidade suficiente para que ocorram as reações que asseguram as propriedades de resistência final do concreto (NEVILLE, 2016);

- **Consistência:** consiste na capacidade de fluidez do concreto fresco. É um dos principais fatores determinantes para a trabalhabilidade do concreto, que está associado ao resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone, também conhecido como *Sulmp-test*, que consiste em verificar a diferença de altura entre o molde e a massa de concreto fresca, ensaio este regido pela NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998). A seguir, a Figura 1 apresenta simplificada o ensaio.

Figura 1 – Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone



Fonte: NBR NM 67 (1998).

2.12 Propriedades do Concreto Endurecido

O processo de endurecimento do concreto inicia a partir da fase de pega do cimento e se completa após período de cura, adquirindo as propriedades mecânicas. Essas propriedades podem variar em função da idade e das condições na qual o concreto é submetido (SILVA, 2005).

2.12.1 Massa Específica

Segundo Almeida (2002), a massa específica do concreto depende de muitos fatores, principalmente da natureza dos agregados, da sua granulometria e do modo

de adensamento utilizado. A massa específica do concreto, geralmente, é o peso da unidade de volume, incluindo os vazios.

Através da massa específica do concreto, Petrucci (1998) apresenta uma classificação do concreto endurecido, podendo ser realizada a partir de tais características:

- Concreto leve: utilização de agregados leves e substâncias que aumentam o volume de vazios, reduzindo assim o peso da unidade. Esse tipo de concreto possui massa específica de aproximadamente 1800 kg/m^3 ;
- Concreto normal: geralmente aplicado em concreto armado, variando a massa específica entre 2300 kg/m^3 e 2400 kg/m^3 ;
- Concreto pesado: concreto de uso mais restrito, mais especificadamente utilizado em blindagens contra radiação; possuindo massa específica de aproximadamente 3700 kg/m^3 .

2.12.2 Resistência Mecânica

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a resistência mecânica do concreto é a capacidade que o mesmo tem de suportar ações aplicadas sem que ocorra colapso na estrutura. A fim de avaliar as características do concreto endurecido, ensaios de diversos tipos podem ser realizados, entre eles destacam-se o ensaio de resistência à compressão e à tração.

A resistência mecânica do concreto é determinada através de ensaios, nos quais se aplicam forças em corpos de provas até que os mesmos se rompam; no entanto, a resistência do concreto endurecido pode sofrer interferências por diversos fatores, sendo eles (NEVILLE, 2016):

- Tipo de cimento: o tipo de cimento a ser utilizado pode influenciar no ganho de resistência ao longo do tempo, podendo variar entre cimentos com alta resistência inicial ou cimentos com ganhos de resistência gradativos;

- Dimensão dos agregados: a utilização de agregados de menores dimensões requer maior quantidade de água de amassamento na mistura, e consequentemente possui maior resistência que concretos com agregados de maiores dimensões;
- Idade: em função das reações químicas decorrentes da hidratação do cimento, as propriedades do concreto podem sofrer variações constantes ao longo do tempo. Esse fenômeno ocorre de forma mais acentuada nos primeiros dias após a concretagem e se mantém de forma reduzida durante praticamente toda a vida útil da estrutura;
- Relação água/cimento: com elevadas quantidades de água no concreto, o mesmo perde resistência e tem sua textura mais porosa. No entanto, exige-se que se tenha um volume mínimo de água na mistura, necessária para que ocorra todas as reações do cimento.

2.12.2.1 Resistência à Compressão

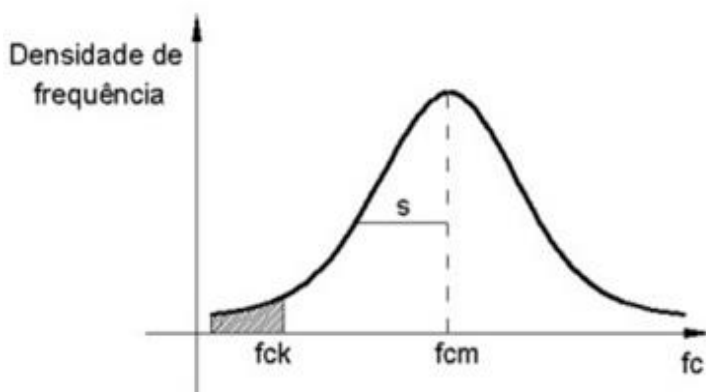
Para Mehta e Monteiro (2014), a resistência à compressão é a propriedade mecânica mais importante; tida como fundamental em projetos estruturais. Normalmente, essa é a única característica analisada em controles de qualidade, pois o ensaio é prático e bastante preciso.

A determinação da resistência à compressão é obtida através de ensaios, realizados em corpos de prova com dimensões padronizadas por norma e curados em câmara úmida com temperatura constante de aproximadamente 20°C. Passadas definidas idades, os corpos de prova têm suas faces retificadas e após são submetidos ao teste de compressão, onde recebem de uma prensa hidráulica um carregamento contínuo até romperem (GIONGO, 2007).

Depois do rompimento dos corpos de prova, é possível perceber diferentes resultados do ensaio à compressão em um mesmo concreto; ou seja, concretos moldados com o mesmo rigor, podem sofrer variações de valores de resistência. Desse modo, é elaborado um gráfico com as resistências obtidas relacionadas com a

densidade de frequência. A curva formada por esse gráfico denomina-se Curva Estatística de Gauss (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004). A seguir, o Gráfico 4 apresenta a Curva de Gauss para resistência do concreto à compressão.

Gráfico 4 – Curva de Gauss



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004).

Segundo Pinheiro, Muzardo e Santos (2004), através da curva de Gauss é possível obter um valor de resistência média do concreto à compressão (f_{cm}), este que é fundamental para determinar a resistência característica (f_{ck}) através da equação 1 a seguir:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s \quad (1)$$

Onde:

f_{ck} = Resistência característica

f_{cm} = Resistência média à compressão

S = Desvio padrão

Os mesmos autores citam ainda que o valor de 1,65 corresponde à 5% de probabilidade de o concreto não atingir o valor de resistência característica à compressão; isto é, entre amostras de concreto, 95% possuem $f_c \geq f_{ck}$. O desvio-padrão (s) é correspondente do ponto de inflexão da curva até a abscissa de f_{cm} .

Portanto, a resistência adotada para fins de cálculo é a resistência característica; pois, a favor da segurança, a mesma já considera a probabilidade de

os resultados de resistência mecânica serem superiores (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2007).

2.12.2.2 Resistência à Tração

Segundo Giongo (2007), mesmo que a resistência à tração do concreto não seja sua melhor característica, sua mensuração é de suma importância, principalmente em situações de segurança estrutural, garantindo um controle de qualidade completo para as construções. Assim como no ensaio de compressão, para o ensaio de tração também são moldados corpos de prova cilíndricos. Para determinar a resistência à tração do concreto, há basicamente três métodos de ensaio, listados a seguir:

- Resistência à tração direta: esse método de ensaio não é muito usual, pois é de difícil execução, podendo os resultados serem interferidos pela forma de se proceder à tração na máquina de ensaio. O ensaio consiste em um mecanismo de fixação que traciona uma peça de concreto, conforme Figura 2 a seguir (ALMEIDA, 2002).

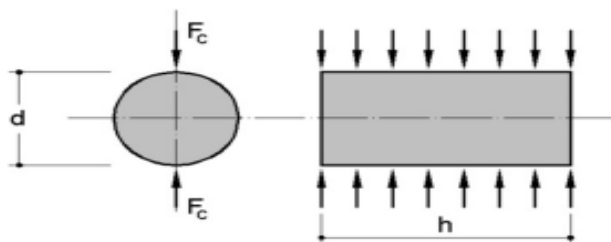
Figura 2 – Ensaio de Resistência à Tração Direta



Fonte: Almeida (2002).

- Resistência à tração por compressão diametral: segundo Pinheiro, Muzardo e Santos (2004), esse é o método de ensaio mais utilizado, pois permite utilizar os mesmos corpos de prova cilíndricos do ensaio à compressão sem necessitar grandes adaptações na prensa. O ensaio consiste em comprimir um corpo de prova cilíndrico ao longo de duas linhas axiais diametralmente apostas, conforme mostra a Figura 3 a seguir.

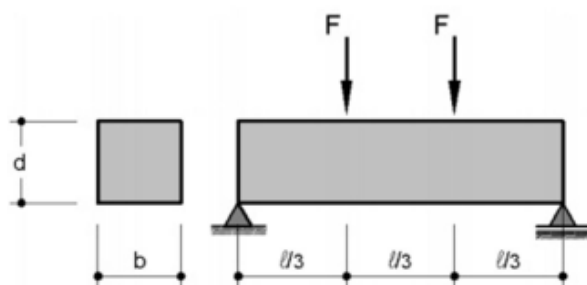
Figura 3 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004).

- Resistência à tração na flexão: conhecido também por “carregamento nos terços”, esse método de ensaio utiliza um corpo de prova de seção quadrada, o qual é submetido à flexão com carregamentos em duas seções simétricas até chegar à ruptura, conforme Figura 4 a seguir (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

Figura 4 – Ensaio de Resistência à Tração por Flexão



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004).

2.13 Permeabilidade do Concreto

Os poros, geralmente presentes em qualquer peça de concreto, dão acesso à agentes externos ao interior da estrutura, causando ataques mais danosos que os superficiais; por isso, a permeabilidade é a principal determinante da vulnerabilidade do concreto à agentes externos. Por esse motivo, para que um concreto seja durável, ele deve ser impermeável (NEVILLE, 2006).

Segundo Neville (2006), a permeabilidade não se baseia somente em poros, mas também em suas dimensões, distribuição e continuidade; ou seja, é possível ter um concreto com poucos poros e com baixa absorção, porém com alta

permeabilidade, basta esses poucos poros possuírem grandes dimensões e estarem conectados entre si. Ainda também, é possível ter um concreto poroso, porém com baixa permeabilidade, uma vez que esses poros sejam pequenos e tortuosos, dificultando assim a passagem de água.

A permeabilidade pode ser afetada por diversos fatores, sendo eles: a relação água/cimento, o preparo, o adensamento, a cura e outros; e não deve ser confundida com absorção, pois a absorção quantifica o número de poros e a permeabilidade mede a penetração de fluídos nesses poros (PETRUCCI, 1998).

2.14 Módulo de Elasticidade

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o aumento da resistência e da rigidez dos compostos cimentícios, estão diretamente ligados ao aumento do módulo de elasticidade e da diminuição da resiliência do material, ou seja, da capacidade que o composto tem de se deformar sem que ocorram fissurações.

Para tal ensaio, é aplicado um carregamento de compressão axial em corpo de prova padrão de forma contínua, até a ruptura; dessa forma, pode-se construir uma curva, esta denominada de diagrama tensão x deformação, que expressa uma relação entre o comportamento elástico do material com a deformação, esta que se reverte imediatamente depois de rompida a amostra (CARVALHO; FIGUEREDO FILHO, 2007).

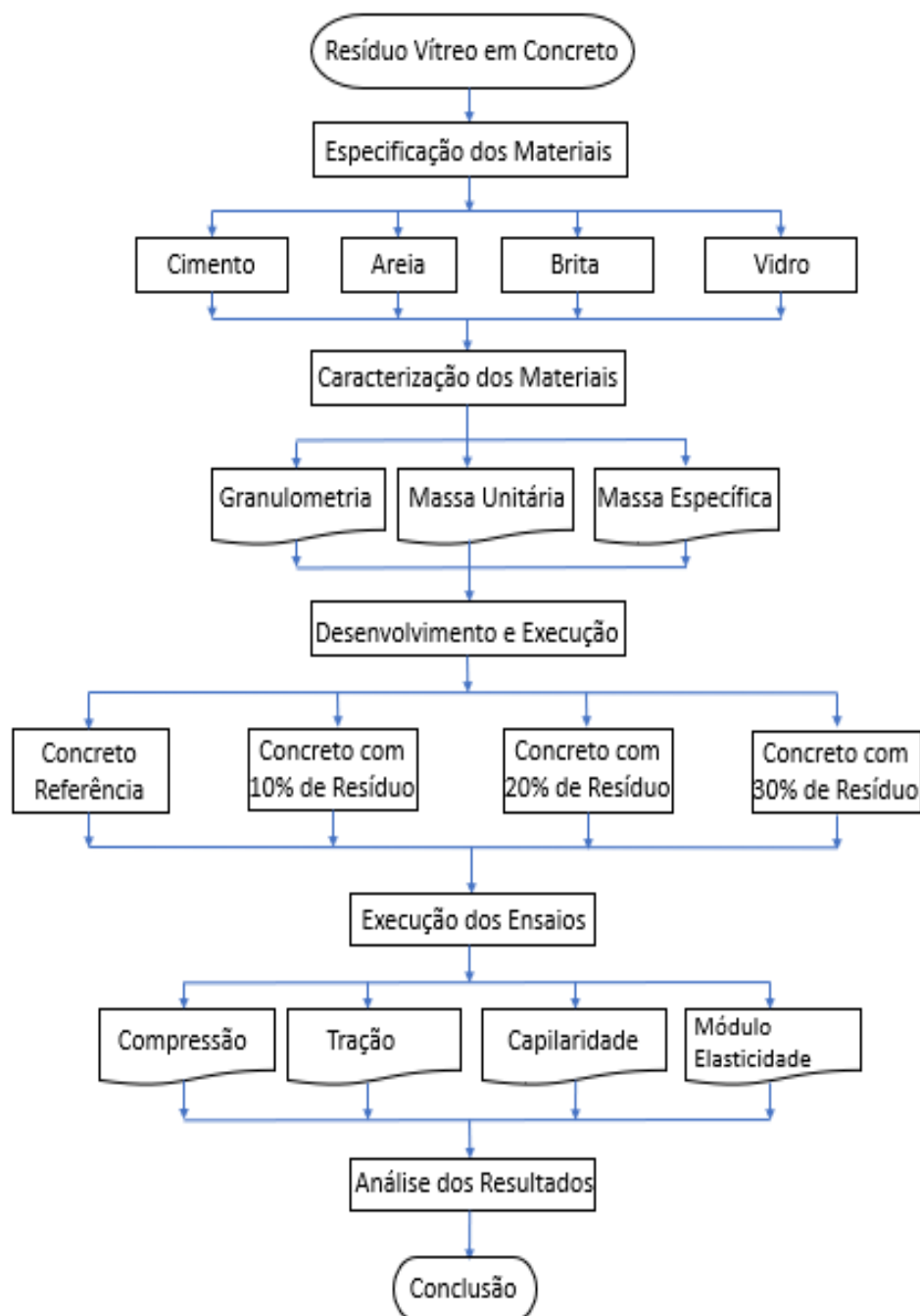
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é abordado os materiais, equipamentos, métodos e os ensaios realizados para atender os objetivos propostos nesse trabalho. As matérias primas utilizadas na moldagem dos corpos de provas foram o cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo, água e resíduo de vidro.

Todos os materiais utilizados na pesquisa foram caracterizados no laboratório de tecnologias da construção (LATEC) da Universidade de Lajeado (UNIVATES); assim como todos os ensaios propostos também foram realizados no mesmo laboratório conforme suas respectivas normas.

Para melhor entendimento, foi criado um fluxograma, demonstrado pela Figura 5, onde é possível visualizar o programa experimental, desde a obtenção dos materiais até os ensaios propostos e análise dos resultados.

Figura 5 – Fluxograma do Programa Experimental



Fonte: Do Autor (2018).

3.1 Cimento

O cimento utilizado na moldagem dos corpos de prova é do tipo *Portland*, classe CP V ARI, regido pela NBR 5733 (ABNT, 1991). Este material é comumente encontrado em lojas de materiais de construção. Além de ser utilizado na pesquisa de Antônio (2012), a escolha por esse tipo de cimento é devido ao baixo teor de adições, limitado ao valor máximo de 5%, além de apresentar desenvolvimento de resistência mais rápido.

Como caracterização do cimento, foi realizado ensaio para obter a massa específica do mesmo, o qual é regido pela NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica (ABNT, 2017). Realizado o ensaio, obteve-se valor de massa específica de $2,84\text{g/cm}^3$.

3.2 Agregado Miúdo

Como agregado miúdo foi utilizado a areia média, essa com granulometria entre 0,15mm e 4,80mm conforme NBR 7211 (ABNT, 2005). Esse agregado, assim como o cimento, também pode ser facilmente encontrado em lojas de materiais de construção.

Para a caracterização do agregado miúdo, foram realizados ensaios para determinação da massa unitária e da massa específica, regidos pela NBR NM 45 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária (ABNT, 2006) e NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2003) respectivamente. Foi realizado também, seguindo a NBR 7211 (ABNT, 2005) a curva granulométrica da areia, a fim de analisar o agregado com os limites estabelecidos em norma.

Para os ensaios de determinação da massa unitária e massa específica, obtiveram-se valores de $1,64\text{g/cm}^3$ e $2,62\text{g/cm}^3$, respectivamente. A areia utilizada, segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) está dentro do limite de zona ótima; e os valores obtidos nos ensaios podem ser observados na Tabela 4 a seguir, bem como

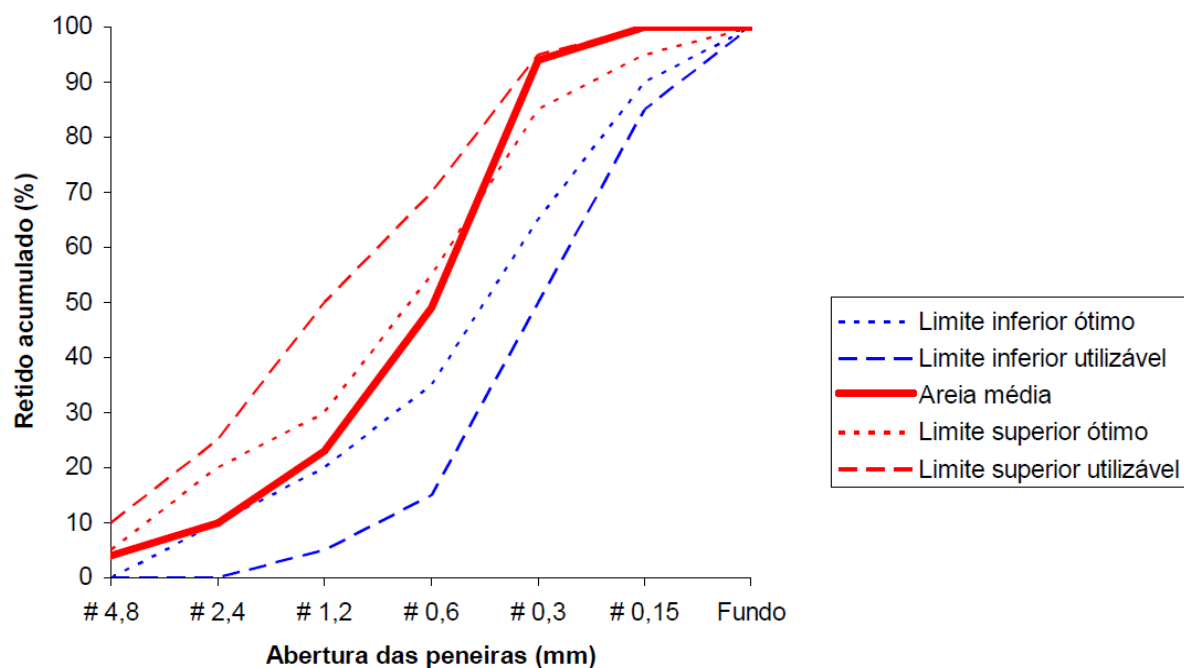
a curva granulométrica em conjunto com os limites estabelecidos em norma, no Gráfico 5.

Tabela 4 – Granulometria da Areia

Areia média		
Peneira (mm)	% Retido	% Retido acumulado
4,8	5	5
2,4	6	11
1,2	13	24
0,6	25	49
0,3	43	92
0,15	8	100

Fonte: Do Autor (2018).

Gráfico 5 – Curva Granulométrica da Areia



Fonte: Do Autor (2018).

3.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo a ser utilizado é do tipo brita 1, com diâmetro máximo de 19mm, oriundo do processo de britagem de rochas basálticas, seguindo diretrizes estabelecidas conforme NBR 7211 (ABNT, 2005). Essa escolha se deu pela facilidade de encontrar esse tipo de material, pois é comumente utilizado na construção civil para edificações de prédios, colunas, vigas e lajes e em usinas de concreto para fabricação do concreto convencional e bombeado.

Como caracterização do agregado graúdo, foi determinado a massa específica e massa unitária, estas regidos pela NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2003) e NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente.

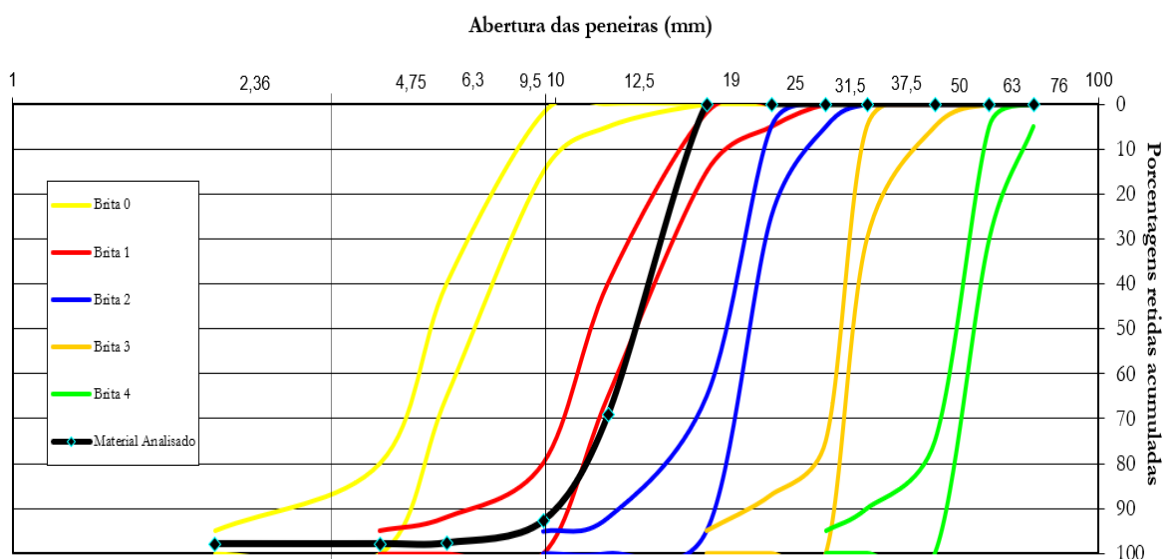
Para o ensaio de determinação da massa unitária obteve-se um valor de 1,15g/cm³; e no ensaio de massa específica 2,53g/cm³. Segundo a norma, dentre os valores obtidos, a brita está entre os limites de classificação para brita 1. Os valores dos ensaios podem ser observados na Tabela 5 a seguir, bem como a curva granulométrica em conjunto com os limites, no Gráfico 6.

Tabela 5 – Granulometria da Brita

Brita 1		
Peneira (mm)	% Retido	% Retido acumulado
12,5	73	73
9,5	18	91
6,3	4,5	95,5
4,8	0,8	96,3
2,4	3,7	100

Fonte: Do Autor (2018).

Gráfico 6 – Curva Granulométrica da Brita



Fonte: Do Autor (2018).

3.4 Resíduo de Vidro

O resíduo de vidro utilizado nos ensaios é oriundo do processo de moagem de garrafas do tipo *long neck*, juntamente com pó de vidro advindo do processo de jateamento com a utilização de microesferas de vidro. Na aquisição dos materiais, uma parcela das garrafas foi obtida através do recolhimento em algumas lixeiras no município de Venâncio Aires; e a outra parcela foi arrecadada no lixão do mesmo Município. Já o pó de vidro oriundo do jateamento, foi cedido por uma empresa do município que realiza tal atividade.

O equipamento para destorroar materiais vitrílicos faz somente o processo de moagem, não separando por completo o rótulo do resíduo de vidro. Para realizar a moagem, as garrafas devem estar secas e limpas. Contudo, as garrafas recolhidas continham impurezas em seu interior, além do papel do rótulo. Assim, a fim de evitar interferências nas reações normais do cimento, o primeiro procedimento adotado foi lavar as garrafas e retirar os rótulos de forma manual. Quanto ao pó do jateamento, este já está pronto para ser peneirado e seguir com os devidos procedimentos, não necessitando moagem.

A moagem das garrafas foi realizada no LATEC com auxílio de um moinho de bolas; porém, o mesmo não conseguia moer as garrafas inteiras, então fez-se necessário fazer uma quebra parcial das garrafas antes de iniciar a moagem. A seguir, a Figura 6 apresenta um resumo dos processos realizados antes de realizar a moagem.

Figura 6 – Procedimentos antes da moagem



Fonte: Do Autor (2018).

O resíduo retirado do moedor mecânico apresentava certa variabilidade granulométrica, com alguns cacos maiores, sendo necessário um peneiramento com malha mais grosseira antes de caracterizar o resíduo. Após esse procedimento, o pó de vidro do jateamento foi misturado ao pó da moagem e peneirado para se obter uma finura que se equiparasse com a finura do cimento Portland, regido pela NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200) - Método de ensaio (ABNT, 2012). A seguir, a Figura 7 apresenta o resíduo de vidro após o peneiramento.

Figura 7 – Resíduo de Vidro após o Peneiramento



Fonte: Do Autor (2018).

Por se tratar de um pó muito fino, é possível que o mesmo absorva com facilidade a umidade do ambiente, por isso, após o processo de moagem, o resíduo foi colocado em estufa por 24 horas para manter o material seco, sem alterar a quantidade de água no traço.

Após obter a finura semelhante ao cimento de aproximadamente 75 μ m, bem como cita a NBR 11579 (ABNT, 2012), foi realizado ensaios de caracterização física do resíduo. Os ensaios físicos realizados foram:

- Determinação da massa específica;
- Índice de absorção.

Para determinar a massa específica do resíduo, foi seguido as diretrizes estabelecidas pela NBR NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de Massa Específica (ABNT, 2001), obtendo-se um valor bastante semelhante ao cimento, chegando em 2,42g/cm³.

Para determinar o índice de absorção do resíduo vítreo, foi seguido a NBR NM 30 – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água – Especificação - (ABNT, 2001). Por se tratar de um pó bastante fino, o teor de absorção de água resultante foi de 0,60%.

3.5 Dosagem dos Concretos

Para determinar um traço referência, foram realizados três traços de concreto: um pobre, um intermediário e um rico; seguindo o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Os traços podem ser visualizados na Tabela 6 a seguir.

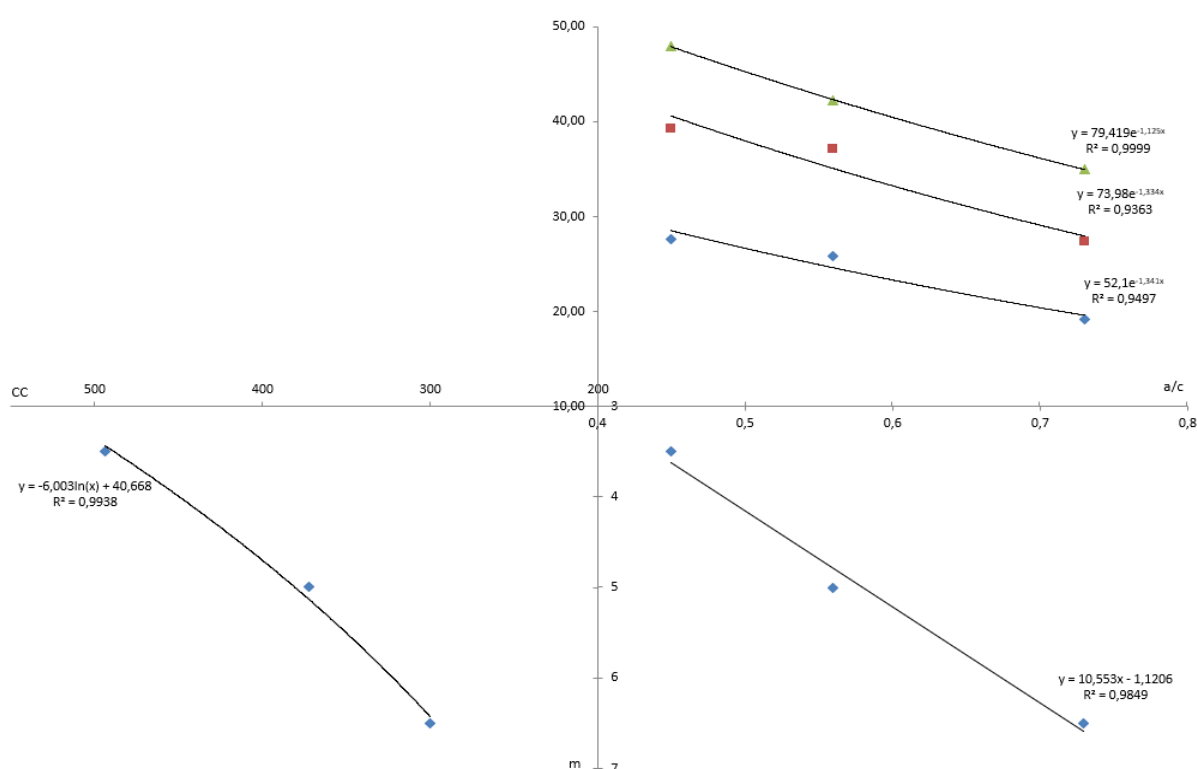
Tabela 6 – Traço do Método IPT/EPUSP

	Cimento	areia (a)	brita (p)	m (a+p)	a/c	Massa Específica (cp circular 10x20)	C-Consumo cimento teórico	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
I	1,00	2,90	3,60	6,50	0,73	3840,0	300,30	19,19	27,32	34,96
II	1,00	2,12	2,88	5,00	0,56	3795,0	372,12	25,84	37,07	42,23
III	1,00	1,31	2,16	3,50	0,45	3800,0	493,47	27,64	39,22	47,92

Fonte: Do Autor (2018).

Decorridos 28 dias da moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram rompidos por compressão axial e a partir dos resultados foi criado um gráfico de dosagem do método, este utilizado para definir diferentes traços e quantificar os materiais utilizados. No Gráfico 7 a seguir, é apresentado a dosagem do método IPT/EPUSP, elaborado a partir dos resultados obtidos através dos três traços moldados inicialmente.

Gráfico 7 – Gráfico de Dosagem IPT/EPUSP



Fonte: Do Autor (2018).

Para definir uma resistência média de referência, foi utilizado como base a NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014). Tal norma estabelece uma resistência mínima de 25MPa em concretos em ambientes com classe de agressividade ambiental II, ou seja, situados em zona urbana; local mais comumente utilizado para construções na atualidade. A norma ainda cita que o concreto para tal classe de agressividade deve ter uma relação água/cimento menor ou igual à 0,60.

Portanto, cumprindo os limites mínimos estabelecidos em norma e baseando a pesquisa nas resistências médias utilizadas nos concretos convencionais, foi definido como referência uma resistência de 30MPa. Os limites estabelecidos em norma podem ser visualizados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Requisitos Mínimos de Resistência

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS

1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Com a resistência referência estabelecida, através do gráfico de dosagem foi definido um traço de concreto para realizar os ensaios. Foram preparadas amostras de concreto sem a adição do resíduo de vidro para servirem como referência, e amostras com substituição parcial do cimento pelo resíduo, nas proporções de 10%, 20% e 30%. A Tabela 8 a seguir, apresenta o traço definido com base na resistência de 30MPa.

Tabela 8 – Traço Referência

Cimento	Areia (a)	Brita (p)	m (a+p)	A/C	C- Consumo cimento teórico
1	2,11	2,88	4,99	0,47	371,0

Fonte: Do Autor (2018).

Os teores de substituição foram realizados em massa; e no intuito de não reduzir a água junto com o cimento, mantendo a quantidade de água constante na mistura, foi definido uma relação de água/aglomerante, que é a soma de material

cimentício mais o resíduo de vidro. Na Tabela 9 a seguir, é possível visualizar os traços com os diferentes percentuais de substituição do cimento pelo resíduo de vidro e a relação água/aglomerante se mantendo constante na mistura.

Tabela 9 – Traços com Resíduo de Vidro

Cimento	Resíduo	Areia (a)	Brita (p)	m (a+p)	A/A	C- Consumo cimento teórico
0,9	0,1	2,11	2,88	4,99	0,47	333,9
0,8	0,2	2,11	2,88	4,99	0,47	296,8
0,7	0,3	2,11	2,88	4,99	0,47	259,7

Fonte: Do Autor (2018).

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, misturando os materiais adicionados, garantindo que a mistura fique homogênea. Depois de obter uma mistura homogênea, uma amostra de cada traço de concreto foi retirada para o ensaio em seu estado ainda fresco. O ensaio a ser realizado tem como objetivo a determinação do índice de consistência com abatimento tronco de cone.

Foram moldados 4 corpos de prova para cada traço, em cada ensaio, para as diferentes idades, definidas em 3, 7, 28 e 63 dias. Os corpos de prova foram moldados seguindo a NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova (ABNT, 2014). A Figura 8 a seguir, apresenta parte dos corpos de provas moldados para os ensaios.

Figura 8 – Corpos de Provas Moldados



Fonte: Do Autor (2018).

Os cilindros de ensaio possuem dimensões de 20cm de altura e 10cm de diâmetro. Após moldados os corpos de prova, os mesmos foram colocados em câmara úmida para que ocorressem as reações necessárias até a data de realização dos ensaios.

O concreto também foi caracterizado em seu estado endurecido, no qual foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão axial em todas as idades, absorção de água por capilaridade somente aos 28 dias bem como módulo de elasticidade aos 63 dias. Todos ensaios foram regidos pelas normas pertinentes aos mesmos.

3.6 Ensaio do Concreto no Estado Fresco

Para realizar o ensaio no concreto em seu estado fresco, foi necessário coletar uma amostra para o ensaiar a consistência, através do abatimento do tronco de cone (*slump*). Para este ensaio, foi colocado uma massa de concreto em uma forma tronco-cônica, dividindo em três camadas sendo estas igualmente adensadas, cada uma com 25 golpes, seguindo a norma NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998).

Após o adensamento, o molde foi retirado verticalmente, e a diferença entre a altura do molde e a altura da massa de concreto foi medida, determinando a consistência do concreto. Como referência, foi adotado um *slump* de classe S100, ou seja, entre 100mm e 160mm de abatimento conforme cita a norma. A seguir, a Tabela 10 apresenta os limites de abatimento e suas respectivas tolerâncias.

Tabela 10 – Limites de Abatimento Tronco de Cone

Classe	Abatimento (<i>A</i>) mm
S10	$10 \leq A < 50$
S50	$50 \leq A < 100$
S100	$100 \leq A < 160$
S160	$160 \leq A < 220$
S220	$A \geq 220$

Fonte: NBR 7212 (2012).

Com o aumento do percentual de substituição, o concreto se mostrou mais seco, ou seja, com menor trabalhabilidade; porém em todos os casos o *slump* ficou dentro da margem estabelecida, resultando em uma média entre todos os traços de 116mm de abatimento. Caso o concreto moldado não ficasse entre os limites estabelecidos, seria necessário realizar uma correção no traço inicialmente proposto utilizando um aditivo plastificante, porém não foi preciso fazer correções. A Figura 9 a seguir, mostra a consistência do concreto de um dos traços realizados.

Figura 9 – Ensaio de Abatimento Tronco de Cone



Fonte: Do Autor (2018).

3.7 Ensaio do Concreto no Estado Endurecido

Para o estado endurecido do concreto, foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e absorção de água por capilaridade.

3.7.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão foi realizado seguindo a NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007); esse ensaio foi realizado no laboratório da Universidade, no qual foram rompidos corpos de provas com idade de 3, 7, 28 e 63 dias para cada traço realizado. Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova tiveram as faces retificadas para garantir planicidade das mesmas, a fim de não haver irregularidade que pudesse interferir nos resultados.

3.7.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração seguiu a normativa NBR 7222 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011). O ensaio, assim como no ensaio de compressão, foi realizado em corpos de prova curados com idades de 3, 7, 28 e 63 dias para cada traço realizado.

3.7.3 Módulo de Elasticidade

Para este ensaio foram rompidos corpos de prova de cada traço, com idade única de 63 dias. As diretrizes seguidas foram retiradas da NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão (ABNT, 2008). Seguindo ainda a normativa, a mesma estabelece que as cargas a serem aplicadas devem ser de 30% da resistência média calculada no ensaio à compressão como resistência máxima ($0,3f_c$), e 0,5 MPa para resistência mínima.

Para execução deste ensaio, foi traçado um plano de carga a partir dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial. Deste modo, o ensaio que define o módulo de elasticidade foi realizado somente após o ensaio de resistência à compressão de cada traço.

3.7.4 Absorção por Capilaridade

A absorção de água por capilaridade está associada à penetração de agentes nocivos ao concreto, o que pode fragilizar o mesmo. Diante disso, o ensaio de absorção capilar se torna indispensável, para ter conhecimento de tais penetrações e assim poder medir a qualidade do concreto (HELENE E TERZIAN, 1993).

O ensaio de absorção de água por capilaridade é uma técnica utilizada para quantificar a capacidade que as argamassas e concretos têm de absorver água. Com isso, para realização desse ensaio, foi seguido os limites estabelecidos na NBR 9779 - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade (ABNT, 2012).

A absorção de água por capilaridade foi ensaiada nos corpos de provas curados com idade de 28 dias. Para este ensaio, a metodologia de moldagem e cura foram as mesmas dos ensaios de resistência à compressão e tração. Atingida a idade definida, antes de secá-los na estufa até a constância de massa, foi realizada a primeira pesagem para determinar a massa natural dos corpos de prova.

Depois de secos, os corpos de prova foram novamente pesados e, em seguida, colocados em um recipiente com lâmina de água constante. Após imergir os corpos de prova, o monitoramento de massa foi realizado em 3, 6, 24, 48 e 72 horas, conforme estabelecido em norma. Após a última pesagem, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, a fim de verificar a ascensão capilar.

4 RESULTADOS

No capítulo anterior foram apresentados os materiais e os métodos estabelecidos para esta pesquisa, bem como as características dos materiais utilizados no programa experimental. Também foram definidos os traços de concreto e os percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro (10%, 20% e 30%, além do traço referência) para a moldagem dos corpos de prova submetidos aos ensaios propostos.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios descritos no programa experimental. Inicialmente são avaliados os resultados dos ensaios realizados com o resíduo de vidro. Em seguida, são analisados os resultados dos ensaios nos concretos em estado fresco, determinação do índice de consistência; e no estado endurecido, com ensaio de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e absorção de água por capilaridade.

4.1 Caracterização do Resíduo de Vidro

O material vítreo foi submetido a alguns ensaios de caracterização quanto a sua massa específica e índice de atividade pozolânica.

4.1.1 Caracterização Física do Resíduo de Vidro

A caracterização física do resíduo de vidro foi realizada através do ensaio de determinação de massa específica. Nesse ensaio, foi constatado que este resíduo possui massa específica igual à $2,42 \text{ g/cm}^3$, indicando que o resíduo de vidro é mais fino que o cimento CP V ARI utilizado, o qual possui massa específica de $2,84 \text{ g/cm}^3$.

A semelhança entre a massa específica do material vítreo com a massa específica do cimento, segundo os autores Antônio (2012) e Nassar e Soroushian (2012), pode ser resultante de uma superfície específica maior, ou seja, o resíduo de vidro pode conter maiores irregularidades em suas partículas em relação as partículas de cimento.

4.1.2 Índice de Atividade Pozolânica

A semelhança entre a composição química do vidro com a composição química do cimento, e o baixo resultado de absorção de água e de massa específica, indicavam que o material vítreo utilizado era um material com alta atividade pozolânica. Para esta constatação, foi realizado o ensaio de determinação de reatividade pozolânica, regido pela NBR 5752 – Materiais Pozolânicos - Determinação de índice de desempenho com Cimento Portland aos 28 dias.

Para que o resíduo de vidro fosse considerado um material pozolânico, o mesmo deveria atingir um índice de atividade pozolânica maior ou igual a 75%. Com isso, foram moldados e rompidos os corpos de provas seguindo a norma, atingindo assim um índice de reatividade pozolânica de 78,43%. A Tabela 11 a seguir, apresenta os resultados dos ensaios para obtenção do índice de atividade pozolânica.

Tabela 11 – Resultado de Atividade Pozolânica

TRAÇO	IDADE 28 DIAS (Mpa)	Traço	Média
REFERÊNCIA	35,69	Referência	32,22
REFERÊNCIA	30,29	Material Pozolânico	25,27
REFERÊNCIA	34,14		
REFERÊNCIA	28,61		
REFERÊNCIA	27,62		
REFERÊNCIA	36,98		
MAT. POZOLÂNICO	25,59		
MAT. POZOLÂNICO	26,27		
MAT. POZOLÂNICO	24,86		
MAT. POZOLÂNICO	27,88		
MAT. POZOLÂNICO	23,17		
MAT. POZOLÂNICO	23,82		

$$I_{\text{cim}} = \frac{25,27}{32,22} \times 100$$

$$I_{\text{cim}} = 78,43\%$$

Fonte: Do Autor (2018).

Conforme Lam, Poon e Cham (2007), o índice encontrado para o resíduo utilizado em seu estudo foi de 81%; e segundo Antônio (2012), o resíduo utilizado em sua pesquisa atingiu índice de atividade pozolânica de 92%. Os mesmos autores citam que, podem haver diferentes valores para a atividade pozolânica, dependendo do tipo de vidro a ser analisado.

4.2 Ensaio Realizado em Concreto Fresco

É de suma importância conhecer o comportamento do concreto em seu estado plástico para que não ocorram prejuízos no desempenho do sistema, uma vez que algumas propriedades do concreto em estado endurecido são afetadas pelas condições de má aplicação do material ainda fresco, podendo até comprometer a vida útil do material.

4.2.1 Ensaio de Abatimento Tronco de Cone

O ensaio foi realizado em todos os traços moldados, obtendo-se valores dentro do estabelecido inicialmente. Os resultados podem ser vistos na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 – Resultados do Abatimento Tronco de Cone

TRAÇO	<i>SLUMP (mm)</i>
Referência	130
10% Vidro	125
20% Vidro	110
30% Vidro	100

Fonte: Do Autor (2018).

Através da tabela apresentada, foi possível observar que quanto maior é o teor de substituição do resíduo de vidro pelo cimento, menor é a trabalhabilidade do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2014), alguns concretos com adições de resíduo de vidro extremamente fino faz-se necessário o uso de aditivos para que seja possível atingir a consistência determinada. Ainda os autores citam que as adições de resíduo tendem a aumentar o consumo de água conforme é aumentado o percentual de adição ou substituição.

Os autores Ismail e Al-Hashmi (2009) e Antônio (2012) fizeram observações semelhantes quanto à trabalhabilidade de concretos com a incorporação de resíduo de vidro, notando também a redução da trabalhabilidade na medida em que aumentava a quantidade de pó de vidro nas misturas. Devido uma maior massa específica do resíduo, o mesmo apresenta maior volume de material para uma mesma massa de cimento, ou seja, maior é a quantidade de material vítreo adicionado à mistura.

4.3 Ensaio Realizado em Concreto Endurecido

No estado endurecido do concreto, foram analisadas as propriedades mecânicas consideradas básicas para garantir um bom desempenho do concreto e consequentemente garantindo maior durabilidade. Análises estas realizadas através dos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, além da avaliação da permeabilidade por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Os resultados obtidos nesses ensaios, bem como as análises estatísticas realizadas, são apresentados e discutidos a seguir.

4.3.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

O ensaio de compressão axial dos concretos foi determinado de acordo com a normativa NBR 5739 (ABNT, 2007), realizado com idades de 3, 7, 28 e 63 dias. Foram ensaiados 4 corpos de prova para cada idade, para cada traço, e os valores obtidos são apresentados na Tabela 13 a seguir.

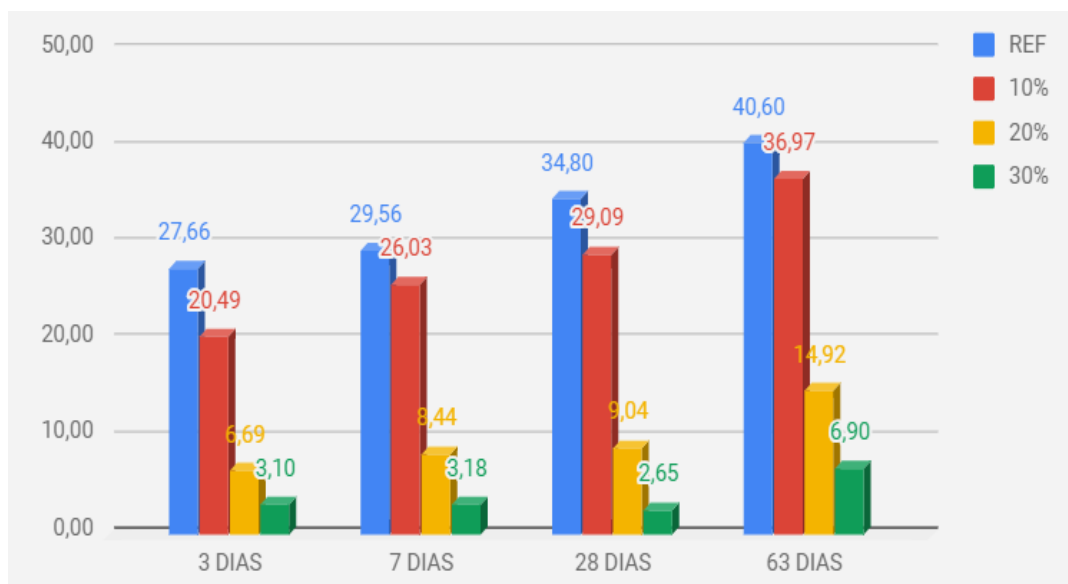
Em seguida, o Gráfico 8 apresenta os valores potenciais das resistências à compressão axial dos concretos analisados para melhor visualização. Os concretos com substituição do resíduo de vidro por cimento, de forma geral, obtiveram resultados inferiores do concreto referência. Contudo, o traço com percentual de substituição de 10% foi o que mais se aproximou da resistência referência, mesmo estando abaixo dos 30MPa estabelecidos, ainda assim atende à resistência mínima exigida na NBR 6118 (ABNT, 2014), diferente dos demais traços com outros teores de substituição, que ficaram bem abaixo da referência.

Tabela 13 – Resultados de Resistência à Compressão Axial (MPa)

TRAÇO	IDADE 3 DIAS	IDADE 7 DIAS	IDADE 28 DIAS	IDADE 63 DIAS
REF	26,77	27,85	30,47	39,89
REF	25,55	29,12	34,8	40,60
REF	26,89	27,84	32,67	40,02
REF	27,66	29,56	30,56	39,70
10%	20,49	23,53	28,46	35,93
10%	19,54	24,13	28,76	34,75
10%	20,28	26,03	29,09	33,92
10%	20,35	23,35	29,06	36,97
20%	6,25	8,05	9,04	13,46
20%	6,69	7,97	2,76	12,54
20%	5,72	8,44	3,48	14,92
20%	6,13	8,43	4,02	13,08
30%	3,10	2,83	2,65	6,12
30%	3,03	3,02	2,47	5,70
30%	2,78	2,98	2,11	6,90
30%	3,03	3,18	2,2	6,31

Fonte: Do Autor (2018).

Gráfico 8 – Gráfico Potencial da Resistência à Compressão Axial (MPa)



Fonte: Do Autor (2018).

A característica dos resultados obtidos se assemelha ao acontecido nas pesquisas de Nassar e Soroushian (2012), onde observaram que os concretos com a incorporação de resíduo de vidro apresentaram valores inferiores ao concreto referência, porém ainda sim, satisfatórios. Em seus estudos, os autores citam que em idades mais avançadas, os concretos com adição de resíduo de vidro melhoraram seus resultados; os autores associam esse feito ao potencial pozolânico do resíduo.

4.3.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Geralmente a resistência à tração dos concretos é considerada uma característica mecânica secundária, uma vez que o concreto não apresenta bons resultados de resistência a esforços de tração nas estruturas. Porém, quando são utilizados novos materiais na mistura do concreto, essa propriedade mecânica se torna um elemento a mais para análise.

Por ser apenas um ensaio complementar, não foram encontradas outras pesquisas que realizaram tal ensaio; com isso, os resultados obtidos não tiveram referências nos quais pudessem ser comparados. Neste ensaio é utilizada a mesma

prensa utilizada para o ensaio de compressão, porém o corpo de prova é posicionado horizontalmente. Para tal ensaio também foram analisados 4 corpos de provas de cada traço em cada idade, estabelecidas em 3, 7, 28 e 63 dias.

Os resultados obtidos do ensaio são apresentados na Tabela 14 a seguir. Logo em seguida, para melhor visualização dos resultados, também é apresentado o gráfico 9, que contém os resultados potenciais das resistências obtidas.

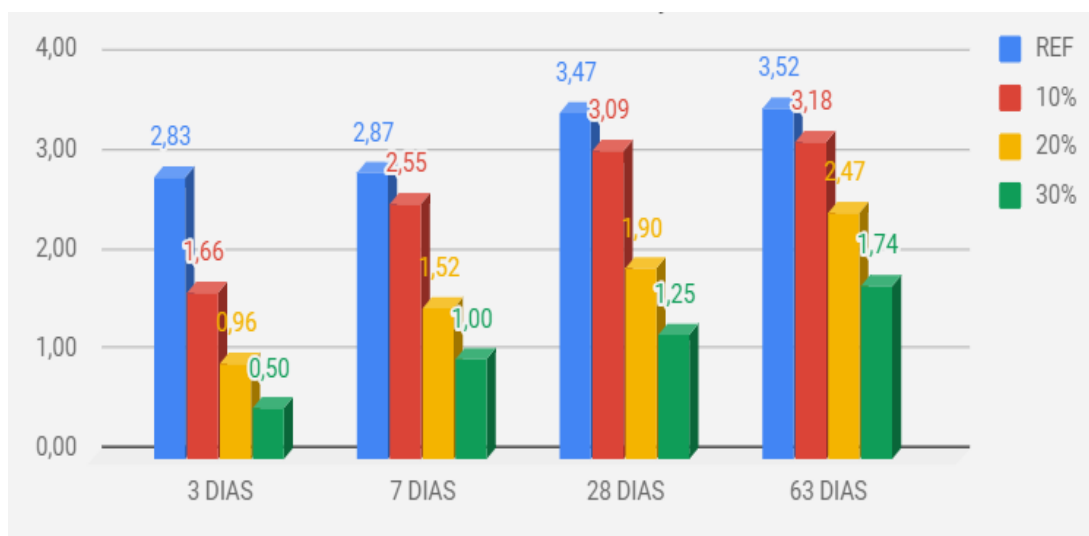
Assim como os concretos ensaiados na compressão axial, os traços com substituição do resíduo de vidro por cimento, de forma geral, também obtiveram resultados inferiores ao concreto referência. Entretanto, o traço com percentual de substituição de 10% foi o que mais se aproximou do traço referência, porém o mesmo teve um ganho considerável de resistência somente a partir de 7 dias de idade, diferente dos demais traços que permaneceram com reduzida resistência em todas idades.

Tabela 14 – Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)

TRAÇO	IDADE 3 DIAS	IDADE 7 DIAS	IDADE 28 DIAS	IDADE 63 DIAS
REF	1,19	2,87	2,80	3,10
REF	2,83	2,36	3,47	3,52
REF	1,35	1,29	3,06	3,35
REF	1,96	2,60	3,23	3,22
10%	1,43	2,55	2,88	3,04
10%	1,66	2,48	2,83	3,18
10%	1,64	2,31	3,09	2,59
10%	1,35	1,36	3,04	2,60
20%	0,91	1,52	1,83	1,99
20%	0,89	1,29	1,89	2,14
20%	0,96	1,32	1,90	2,47
20%	0,66	0,89	1,88	1,87
30%	0,35	0,76	1,13	1,62
30%	0,09	0,98	1,25	1,12
30%	0,41	0,98	0,97	1,47
30%	0,50	1,00	1,17	1,74

Fonte: Do Autor (2018).

Gráfico 9 – Gráfico Potencial da Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Do Autor (2018).

4.3.3 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

O tamanho da continuidade dos poros capilares presentes na amostra determina a permeabilidade da mesma. Essa característica está diretamente relacionada com a durabilidade do concreto, pois a água, juntamente com agentes agressivos, é responsável por processos de deterioração da amostra (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os mesmos autores citam ainda que o método de incorporar adições minerais tende a reduzir a permeabilidade das amostras, melhorando assim as propriedades mecânicas e demais aspectos relacionados à durabilidade.

A permeabilidade de uma amostra de concreto pode ser determinada seguindo o ensaio de absorção de água por capilaridade. Nessa ocasião, o ensaio foi realizado seguindo a normativa NBR 9779 (ABNT, 2012), onde foram realizadas medições em um período de 72 horas, resultando nos valores apresentados na Tabela 15 a seguir. Para esse ensaio, foram analisados 3 corpos de prova para cada teor de substituição.

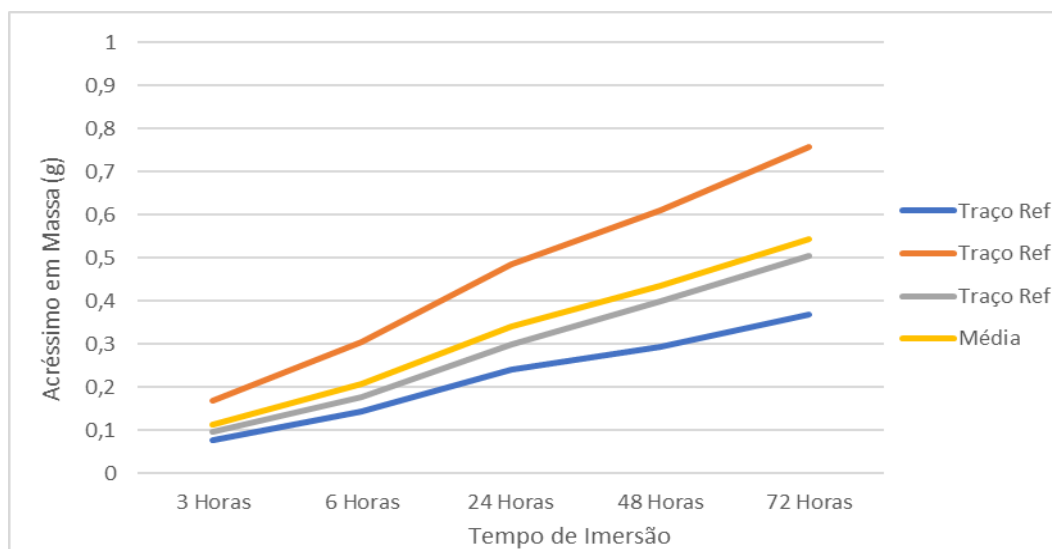
Tabela 15 – Resultados de Absorção de Água por Capilaridade

TRAÇO	PESAGEM INICIAL (g)	PESAGEM PÓS ESTUFA (g)	3 HORAS (g)	6 HORAS (g)	24 HORAS (g)	48 HORAS (g)	72 HORAS (g)
Referência	3954,1	3807,5	3813,7	3818,8	3826,4	3830,6	3836,4
Referência	3999,3	3789	3802,3	3812,9	3827,2	3836,9	3848,5
Referência	3984,4	3743,3	3750,9	3757,2	3766,8	3774,8	3782,9
10% Subst.	3849,4	3654,9	3659,8	3664,5	3667,2	3673,9	3678,5
10% Subst.	3753,6	3560	3564,2	3567,3	3572,6	3580,1	3585,4
10% Subst.	3952,1	3754,2	3762,6	3770,2	3782,8	3795	3805,8
20% Subst.	3772,1	3515,7	3526,6	3539,9	3557,9	3575	3591,2
20% Subst.	3720,8	3457,5	3464,3	3470,6	3481,5	3495,7	3506,3
20% Subst.	3730,3	3476,5	3487	3495,5	3508,7	3521,5	3533
30% Subst.	3572,3	3311	3323,9	3333,7	3345,3	3358,2	3370,2
30% Subst.	3495,7	3221	3233,8	3243,3	3256	3268,5	3281
30% Subst.	3622,2	3361,9	3373,6	3383,2	3395,9	3408,2	3419,9

Fonte: Do Autor (2018).

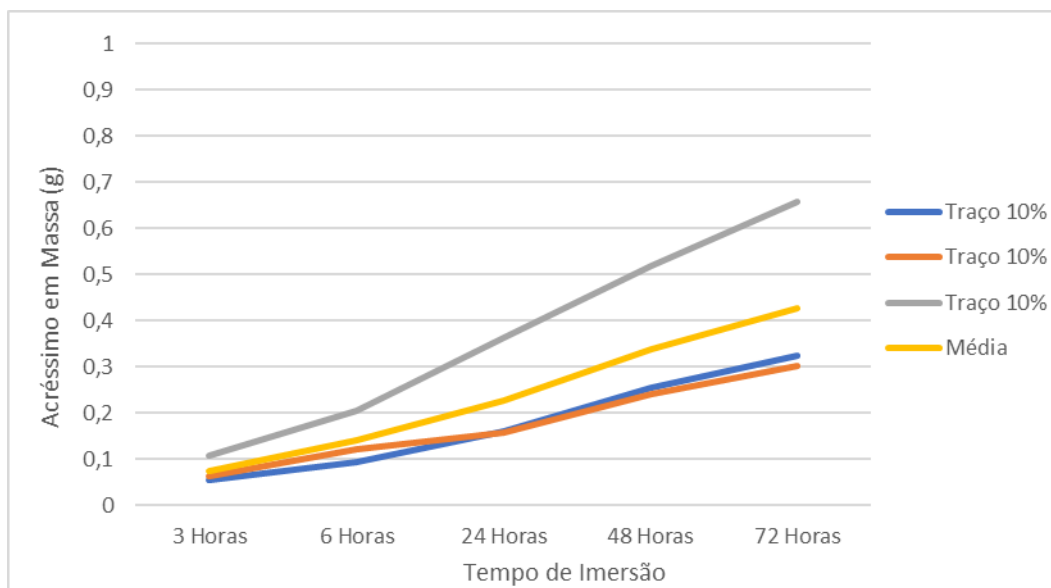
Para melhor visualização dos resultados, a seguir é apresentado o Gráfico 10 com a curva de absorção de água do traço referência, e também os Gráficos 11, 12 e 13 que representam as curvas de absorção de água por capilaridade dos três traços moldados com os teores de 10%, 20% e 30% de substituição do material cimentício pelo resíduo de vidro, respectivamente.

Gráfico 10 – Absorção de Água do Traço Referência



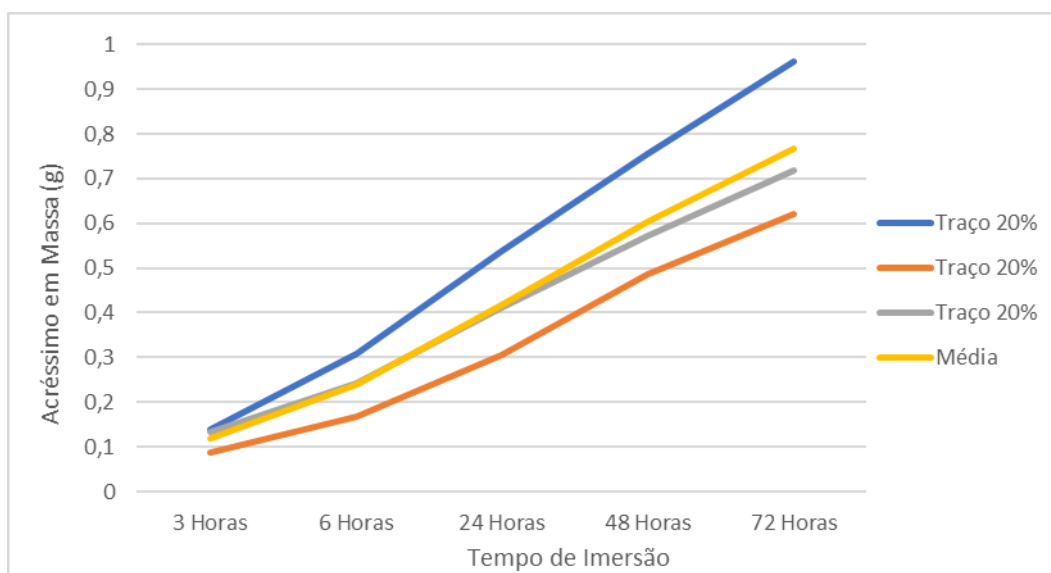
Fonte: Do Autor (2018).

Gráfico 11 – Absorção de Água do Traço com 10% de Resíduo



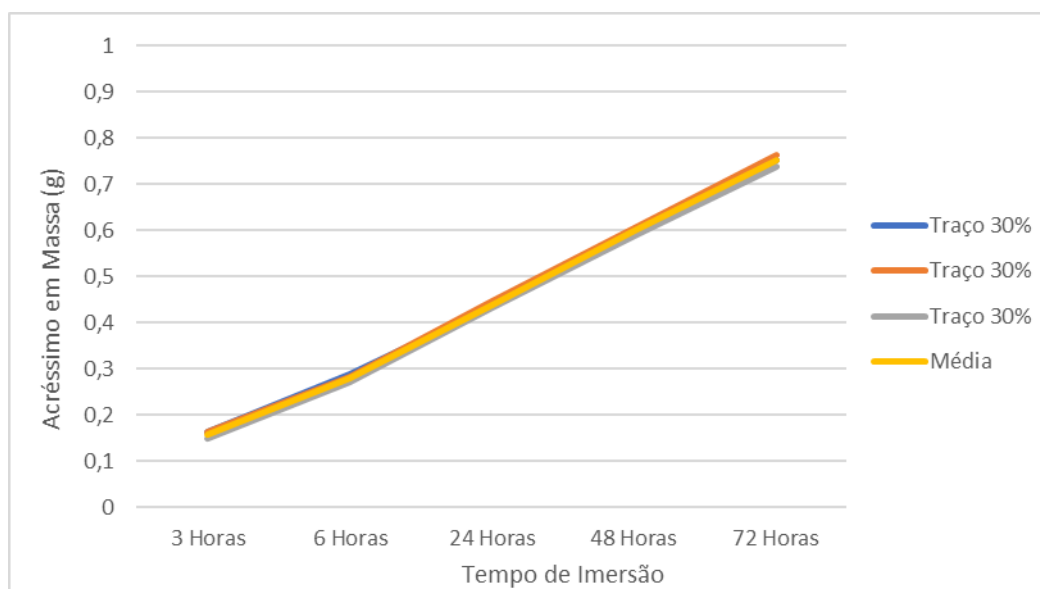
Fonte: Do Autor (2018).

Gráfico 12 – Absorção de Água do Traço com 20% de Resíduo



Fonte: Do Autor (2018).

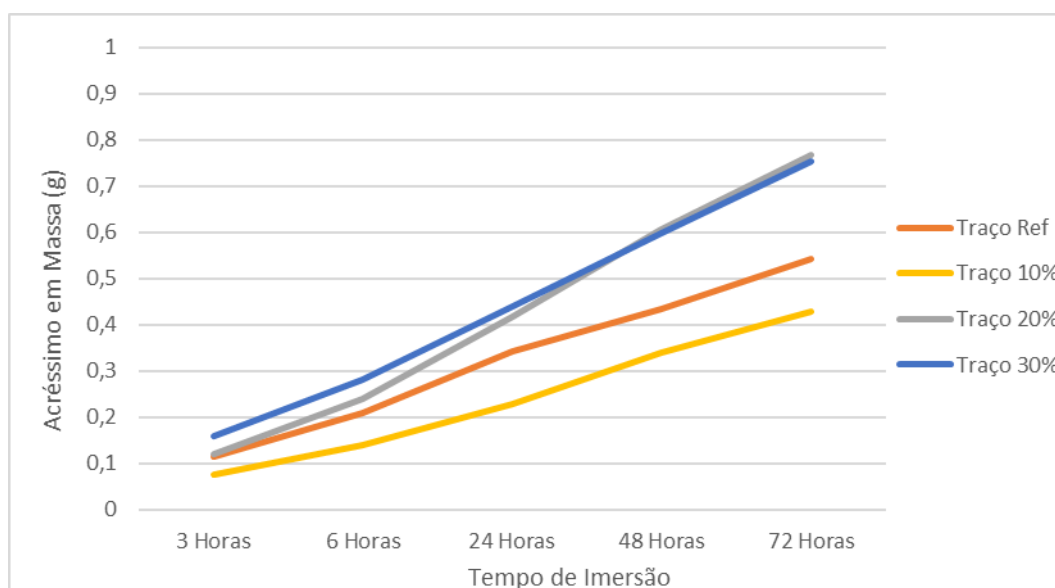
Gráfico 13 – Absorção de Água do Traço com 30% de Resíduo



Fonte: Do Autor (2018).

Como pode ser observado nas curvas de absorção apresentadas anteriormente, o traço com percentual de adição de 10% de resíduo de vidro em substituição parcial do cimento obteve melhores resultados quando comparado aos demais. A média do traço com 10% de vidro se manteve de forma mais regular e abaixo das demais médias, caracterizando um concreto menos permeável, conforme pode ser visto no Gráfico 14 a seguir.

Gráfico 14 – Médias de Absorção de Água dos Diferentes Traços



Fonte: Do Autor (2018).

Segundo Antônio (2012), as adições de pó de vidro tendem a reagir com o hidróxido de cálcio oriundo da reação química de hidratação do cimento, gerando silicatos de cálcio hidratado, que ocupam os vazios, reduzindo a permeabilidade e absorção da amostra cimentícia. Ainda Antônio (2012) e Ismail e Al-Hashmi (2009), em seus estudos observaram uma redução de absorção de água por capilaridade com o aumento do teor de resíduo de vidro incorporado aos concretos.

Diferente dos ensaios encontrados pelos autores anteriormente citados, conforme o teor de adição de resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento aumentou, a permeabilidade também aumentou, caracterizando um concreto poroso de baixa resistência e durabilidade, como pode ser visualizado nos resultados de resistência mecânica anteriormente apresentados. Contudo, nesse ensaio o traço com percentual de 10% de adição de resíduo de vidro teve melhor desempenho e menor índice de absorção do que o traço referência, sendo nessa ocasião menos poroso e com menor permeabilidade.

4.3.4 Ensaio de Módulo de Elasticidade

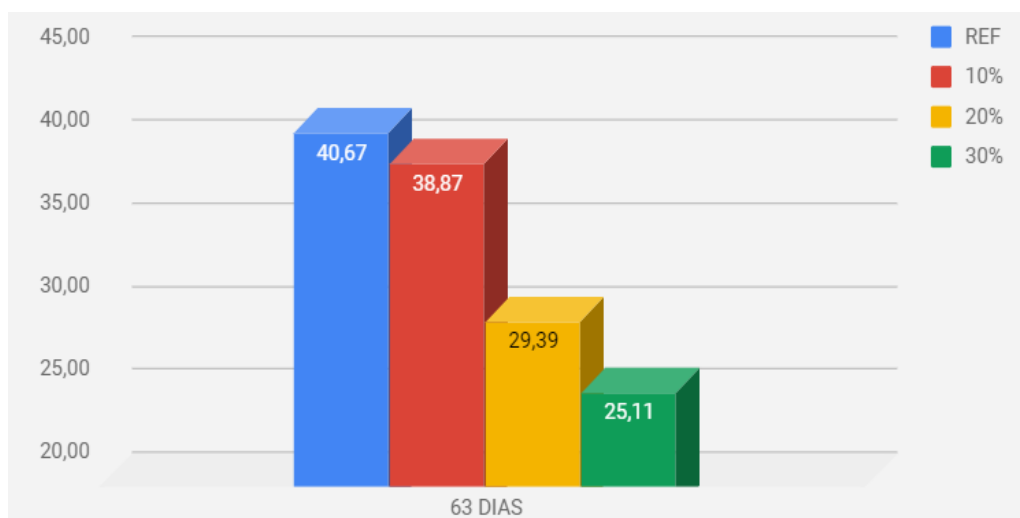
Segundo Mehta e Monteiro (2008), o módulo de elasticidade é uma das características mais importantes a ser analisada, pois determina a capacidade do concreto se deformar diante de uma tensão aplicada dentro de um limite proporcional assumido. O módulo foi definido com idade de 63 dias, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 16 e no Gráfico 15, que facilita a visualização dos resultados.

Tabela 16 – Resultados do Módulo de Elasticidade

TRAÇO	IDADE 63 DIAS
REF	39,18
REF	40,20
REF	40,67
10%	33,16
10%	36,81
10%	38,87
20%	28,65
20%	29,14
20%	29,39
30%	22,28
30%	23,16
30%	25,11

Fonte: Do Autor (2018).

Gráfico 15 – Gráfico Potencial dos Resultados de Módulo de Elasticidade



Fonte: Do Autor (2018).

Ao comparar os resultados do ensaio de compressão axial e do módulo de elasticidade, é possível observar uma semelhança no comportamento dos compostos cimentícios, pois quanto maior o teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro, maior é a tendência de queda do módulo de elasticidade.

Antônio (2012), avaliou a influência da substituição de 20% de cimento por resíduo de vidro em concretos com idade de 28 dias, onde obteve valores médios que variavam entre 29 e 31 GPa; Nassar e Soroushian (2012), também analisaram o módulo de elasticidade com o mesmo teor e na mesma idade que Antônio (2012), onde os resultados variaram entre 31 e 35 GPa. Comparando os resultados dos autores com os resultados obtidos nessa pesquisa, o traço com teor de substituição de 20% também obteve média de aproximadamente 30 GPa.

Em análise dos resultados, o traço com percentual de substituição de 10% foi o que mais se assemelhou do módulo do traço referência, estando abaixo em valor inferior à 2GPa, diferente dos demais traços que ficaram com valores bastante divergentes.

5 CONCLUSÕES

Para concluir, foi feita uma análise do desempenho mecânico do concreto convencional com adição de resíduo de vidro como substituição parcial do cimento, com o objetivo de utilizar esse resíduo como nova opção de material para construção, promovendo uma redução da quantidade de cimento utilizada para a produção de concretos, propondo uma solução para reutilização ambientalmente correta.

A análise química do resíduo analisado confirmou este material como aceitável para fins cimentantes, pois atingiu o índice de atividade pozolânica mínima estabelecido em norma.

Após analisar e discutir os resultados dos traços realizados, foi possível observar que um percentual de 10% substituição do cimento pelo resíduo de vidro não gerou efeitos positivos excepcionais, mas também não ocasionou significativas perdas das propriedades. Contudo, os traços com percentuais de 20% e 30% de substituição, produziram perdas significantes das propriedades mecânicas, o que pode significar uma falta de água na mistura para que ocorressem as reações necessárias, uma vez que a quantidade de água foi mantida e a massa de resíduo aumentou.

Em estado fresco, todos os traços se mantiveram com as características semelhantes ao traço referência, porém conforme aumentava o teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro, menor era a trabalhabilidade do concreto, ou seja,

o concreto ficava mais seco, dificultando seu manuseio. Contudo, o traço com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de vidro se manteve mais semelhante ao concreto referência, onde tanto as características físicas quanto mecânicas se mantiveram similares ao traço referência e compatíveis com valores mínimos de resistência estabelecidos em norma.

Para os resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração, apenas o traço com percentual de 10% de substituição foi satisfatório, atingindo os 30MPa estabelecidos inicialmente no ensaio de compressão, e se equiparando com o traço referência, mostrando-se compatível com a resistência de concretos estabelecida em norma.

Referente ao ensaio de permeabilidade, observou-se que a absorção do concreto aumentou com elevados teores de substituição, sendo as argamassas com 20% e 30% de substituição as com maior permeabilidade, ou seja, com maiores poros presentes. Essa elevada permeabilidade pode reduzir os parâmetros associados à durabilidade. Contudo, o concreto com teor de 10% de substituição obteve menor permeabilidade que o traço referência, se mostrando com menor quantidade de vazios.

Para os resultados do ensaio de módulo de elasticidade, apenas o traço com teor de 10% de substituição do cimento pelo resíduo de vidro foi satisfatório, sendo ele o mais semelhante e com menor divergência dos resultados, tendo variação dos resultados inferior à 5%.

Com base nos ensaios realizados nessa pesquisa, acredita-se que substituir parcialmente o cimento por resíduo de vidro em um teor de até 10% seja viável, diferente dos demais percentuais analisados, onde o concreto apresentou significativas perdas de suas características físicas e mecânicas. Mesmo os 10% sendo um percentual baixo, em grande escala, tal teor resultaria em um grande volume de redução de cimento, ou seja, uma significativa minimização dos impactos ambientais ocasionados pela extração da matéria prima do cimento, bem como redução da emissão de gases liberados na fabricação do mesmo.

Sendo assim, a aplicação do resíduo de vidro no concreto com percentual de substituição de 10% do cimento, indicou uma possibilidade de aplicação como substituto parcial de materiais como a sílica ativa. Contudo, novos estudos devem ser realizados para compreender o comportamento dos diferentes tipos de resíduos vítreos, sobretudo dos parâmetros referentes à durabilidade.

A partir do tema abordado nessa pesquisa, sugere-se como trabalhos futuros, novos temas que poderão servir como base para outros trabalhos de conclusão, por exemplo:

- Análise de diferentes faixas granulométricas de resíduo vítreo, buscando um material mais fino que o utilizado nessa pesquisa, buscando se encaixar aos materiais classificados como resíduo de vidro ultrafino;
- Análise da utilização do resíduo de vidro como adição à massa de concreto, ao invés de substituição, em baixos percentuais;
- Análise de possíveis expansões do material de vidro ao longo do tempo devido à ocorrência de reações álcali-sílica;
- Análise do coeficiente de dilatação térmica e da condutividade térmica em concretos com adição de resíduo vítreo;
- Análise quantitativa do custo de utilização desse resíduo, bem como a redução do consumo de cimento.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, Paula Lima. **Aspectos da Sustentabilidade**: Estudo de Bloco para Vedação Produzido a Partir de Resíduos da Construção Civil. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Arquitetura). Universidade Fumec. Belo Horizonte: 2009.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO. **Reciclagem de Vidro**. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br/reciclagem-abividro>>. Acesso em 12 mar. 2018.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <<http://www.justicaeleitoral.jus.br/arquivos/lei-12-305-2010-pnrs/view>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, no 136, 17 de julho de 2002. Seção 1. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legipesq.cfm?tipo=3&numero=307&ano=&texto=>>>. Acesso em: 17 mai. 2018.

FRANÇA, Rosiléa Garcia; RUARO, Édina Cristina Rodrigues. Diagnóstico da disposição final dos resíduos sólidos urbanos na região da Associação dos Municípios do Alto Irani (AMAI), Santa Catarina. **Ciência e saúde coletiva**, Rio de Janeiro, v.14, n.6, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141381232009000600026&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 15 abr. 2018.

LÓPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P; NETO, E. B. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro moído como agregado fino. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 320, dez. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036669132005000400003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 02 mai. 2018.

ROSÁRIO, Thaís do; TORRESCASANA, Carlos E. N. **Tijolo de solo-cimento produzidos com resíduos de concreto**. 2011. 15 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Comunitária da Região de Chapecó, 2011. Disponível em: <<http://www.unochapeco.edu.br/static/data/portal/downloads/1508.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

LUZ, A. P.; RIBEIRO S. **Uso de pó de vidro como fundente para produção de grês porcelanato**. Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, mar. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762008000100011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 15 abr. 2018.

MATOS, Ana Mafalda. **Estudo de Argamassa com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moído**. 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2010.

ALI, M.B; SAIDUR, R; HOSSAIN, M.S. **A review on emission analysis in cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, nº15, 2011.

BARBOZA, A.S.R et al. **Avaliação do uso de bambu como material alternativo para execução de habitação de interesse social**. Ambiente Construído, 2008.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 674 p. IBRACON, São Paulo, 2008.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007.

CHEN, S. *et al.* **A state-of-the-art review and evaluation of tools for factory sustainability assessment**. Procedia CIRP.N.9, 2013.

GOBBI, A.; MATTANA, A. J.; MEDEIROS, de M. H. F. **Uso de análise hierárquica para a escolha de adições pozolânicas para o concreto: Uma aplicação inicial**. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2011.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Pini; Brasília, DF.SENAI, 1992.

JOHN, Vanderley M; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. Seminário Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo, 2000.

LIMA, S. A; ROSSIGNOLO, J. A. **Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca de castanha de caju para uso em materiais cimentícios**. Acta Scientiarum Technology, 2010.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. **Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement**. Construction and Building Materials, v. 36, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutural, propriedades e materiais**, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2008.

NETO J. C. M. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo: RIMA, 2005.

OLIVEIRAC, T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. São Paulo, Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

GARÉ, José Carlos. **Contribuições da construção civil brasileira para o desenvolvimento sustentável**. 2011. 164f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Faculdade de Administração, Universidade Municipal de São Caetano do Sul, São Caetano do Sul, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.uscs.edu.br/handle/123456789/252>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

GODINHO, K. O.; HOLANDA, J. N. F.; SILVA, A. G. P. da. Obtenção e avaliação de propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos à base de argila e vidros reciclados. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 320, Dez. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000400018>. Acesso em 11 nov. 2018.

LUCAS, Denis; BENATTI, Cláudia T. **Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, América do Norte, v.1, n.3, dez. 2008. Disponível em: <<http://www.unicesumar.edu.br/pesquisa/periodicos/index.php/rama/article/view/850/663>>. Acesso em: 04 nov. 2018.

MONTANO, Paulo F.; BASTOS, Hugo B. A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, n. 38, p. 265-290. 2013. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3807.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2018.

MUCELIN, Carlos A. **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias**. 2. Ed. Medianeira: Valério, 2006.

MUCELIN, Carlos A; BELLINI, Marta. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 111-124, jun. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sn/v20n1/a08v20n1.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2018.

SANTOS, Amélia S. F. et al. Tendências e Desafios da Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 14, n. 5, jun. 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v14n5/23062.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2018.

AMBROZEWICZ, P.H.L **Materiais de Construção - Normas, Especificações, Aplicação e Ensaio de Laboratório- 1ª Edição**. Ed.: PINI. 2012. ISBN: 978-85-7266-264-2. Português, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto – 2ª edição**. Ed.: Bookman. 2013. ISBN:978-85-8260-071-9. Português, 2013.

PETRUCCI, E. G.R. **Concreto de Cimento Portland 13ª Edição rev. Por Vladimir Antônio Paulo** Ed.: GLOBO S.A. ISBN:85-250-0225-9,1998.

CHEN, S. *et al.* **A state-of-the-art review and evaluation of tools for factory sustainability assessment.** Procedia CIRP.N.9, 2013.

ANGULO, S.C.; ZORDAN, S.E; JOHN V.M. **Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil.** In Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2011 – materiais reciclados e suas aplicações. CT206 – IBRACON. São Paulo 2011.

VALÉRIO, Diogo; SILVA, Taís C. da; COHEN, Claude. **Redução da geração de resíduos sólidos: uma abordagem econômica.** 2008. 17 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal Fluminense, 2008. Disponível em: < <http://www.anpec.org.br/encontro2008/artigos/200807211417570-.pdf>>. Acesso em: 19 mai. 2018.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A.; Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. **Waste Management**, v.29, 2009.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (Livre Docência)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

SILVA, Ângelo J. C. e; BARBOSA, Fred R; MOTA, João M. F; CARVALHO, João R. de; **Utilização de vidro reciclado para produção de concreto verde em Fernando de Noronha,** Vitória, 2011. Disponível em: <http://www.vieiramota.com.br/artigo_revisado_%20elecs2011.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2018.

FRAGATA, A.; VEIGA, M. R.; VELOSA, A. L.; FERREIRA, V.M. **Incorporação de Resíduos de Vidro em argamassas de revestimento – Avaliação da sua influência nas características da argamassa.** 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Parque das Nações – Lisboa, 2007.

NASSAR R.; SOROUSHIAN P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 29, 2012.

PINTO, T. P. **Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil. Situação Atual.** In Reciclagem de Resíduos como Materiais de Construção Civil. São Paulo, 1996.

AMBEV – **Relatório de Sustentabilidade**, São Paulo, 2016. Disponível em: https://www.ambev.com.br/conteudo/uploads/2017/05/Ambev_Relat%C3%B3rio_Sustentabilidade_2016.pdf . Acesso em: 31 mai. 2018.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LAM, C. S.; POON, C. S.; CHAN, D. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass - ARS consideration. **Cement and Concrete Composites**, v.29, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro – 2017.

_____ – **NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**, Rio de Janeiro – 2015.

_____ – **NBR 5738 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**, Rio de Janeiro – 2014.

_____ – **NBR 9779 – Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**, Rio de Janeiro – 2012.

_____ – **TÉCNICAS – NBR 7212 – Execução de concreto dosado em central - Procedimento**, Rio de Janeiro – 2012.

_____ – **NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da peneira 75µm (nº 200) - Método de ensaio**, Rio de Janeiro – 2012.

_____ – **NBR 7222 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro – 2011.

_____ – **NBR 8522 – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**, Rio de Janeiro – 2008.

_____ – **NBR 5739 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Rio de Janeiro – 2007.

_____ – **NBR 6467 – Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de Ensaio**, Rio de Janeiro – 2006.

_____ – **NBR 7199 – Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações**, Rio de Janeiro – 2006.

_____ – **NBR NM 45:2006– Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária**, Rio de Janeiro – 2006.

_____ – **NBR 7211 – Agregados para Concreto - Especificação**, Rio de Janeiro – 2005.

_____ – **NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação**, Rio de Janeiro – 2004.

_____ – NBR NM 52 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro – 2003.

_____ – NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro – 2003.

_____ – NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de Massa Específica, Rio de Janeiro – 2001.

_____ – NBR NM 67 – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro – 1998.

_____ – NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro – 1996.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil